

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Escuela Universitaria

De

Ingeniería Técnica de Telecomunicación



PROYECTO FIN DE CARRERA

FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
AUTÓNOMOS

Evelio Gil Cardador

Septiembre 2012

PROYECTO FIN DE CARRERA

PLAN 2000



E.U.I.T. TELECOMUNICACIÓN

TEMA: FIABILIDAD ENERGÍA FOTOVOLTAICA

TÍTULO: FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS

AUTOR: EVELIO GIL CARDADOR

TUTOR: MANUEL VAZQUEZ LÓPEZ

Vº Bº.

DEPARTAMENTO: ELECTRÓNICA FÍSICA

Miembros del tribunal calificador:

PRESIDENTE: JAVIER SÁNCHEZ JIMÉNEZ

VOCAL: MANUEL VAZQUEZ LÓPEZ

VOCAL SECRETARIO: NEFTALÍ NUÑEZ MENDOZA

Fecha lectura: Septiembre de 2012

Calificación: El secretario,

RESUMEN DEL PROYECTO:

En este proyecto se pretende evaluar la fiabilidad en los sistemas fotovoltaicos autónomos. La fiabilidad es un concepto de vital importancia ya que estos sistemas precisan de esta para poder operar en zonas remotas donde es muy difícil el acceso a la energía eléctrica durante el mayor tiempo posible y con los menores costes posibles.

Primeramente se introduce al lector en el contexto de las energías renovables, esto es, principales fuentes de energía, situación del mercado actual en el ámbito nacional e internacional, etc.

Se abordará el concepto de fiabilidad, fallo, y los conceptos y expresiones más importantes relacionados con ambos. Nos ayudaremos de fórmulas y gráficas para una mejor comprensión. Esta teoría se aplicará al terreno de la energía fotovoltaica, obteniendo así las primeras conclusiones.

Para corroborar la teoría explicada se consultarán diferentes fuentes de datos de diversos programas de electrificación rural.

Dedicado

A mis padres Evelio y Elia
y mi hermano Manuel

Resumen

Los sistemas fotovoltaicos autónomos, es decir, sistemas que carecen de conexión a la red eléctrica, presentan una gran utilidad para poder llevar a cabo la electrificación de lugares remotos donde no hay medios de acceder a la energía eléctrica.

El continuo avance en el número de sistemas instalados por todo el mundo y su continua difusión técnica no significa que la implantación de estas instalaciones no presente ninguna problemática.

A excepción del panel fotovoltaico que presenta una elevada fiabilidad, el resto de elementos que forman el sistema presentan numerosos problemas y dependencias, por tanto el estudio de las fiabilidades de estos elementos es obligado.

En este proyecto se pretende analizar y estudiar detalladamente la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos aislados.

Primeramente, el presente documento ofrece una introducción sobre la situación mundial de las energías renovables, así como una explicación detallada de la energía fotovoltaica. Esto incluye una explicación técnica de los diferentes elementos que forman el sistema energético (módulo fotovoltaico, batería, regulador de carga, inversor, cargas, cableado y conectores).

Por otro lado, se hará un estudio teórico del concepto de fiabilidad, con sus definiciones y parámetros más importantes.

Llegados a este punto, el proyecto aplica la teoría de fiabilidad comentada a los sistemas fotovoltaicos autónomos, profundizando en la fiabilidad de cada elemento del sistema así como evaluando el conjunto.

Por último, se muestran datos reales de fiabilidad de programas de electrificación, demostrando la variedad de resultados sujetos a los distintos emplazamientos de las instalaciones y por tanto distintas condiciones de trabajo.

Se destaca de esta forma la importancia de la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos, pues normalmente este tipo de instalaciones se localizan en emplazamientos remotos, sin personal cualificado de mantenimiento cercano ni grandes recursos logísticos y económicos.

También se resalta en el trabajo la dependencia de la radiación solar y el perfil de consumo a la hora de dimensionar el sistema.

Abstract

Stand-alone photovoltaic systems which are not connected to the utility grid. These systems are very useful to carry out the electrification of remote locations where it is not easy to access to electricity.

The number increased of systems installed worldwide and their continued dissemination technique does not mean that these systems doesn't fail.

With the exception of the photovoltaic panel with a high reliability, the remaining elements of the system can have some problems and therefore the study of the reliabilities of these elements is required.

This project tries to analyze and study the details of the reliability of stand-alone PV systems.

On the one hand, this paper provides an overview of the global situation of renewable energy, as well as a detailed explanation of photovoltaics. This includes a technical detail of the different elements of the energy system (PV module, battery, charge controller, inverter, loads, wiring and connectors).

In addition, there will be a theoretical study of the concept of reliability, with the most important definitions and key parameters.

On the other hand, the project applies the reliability concepts discussed to the stand-alone photovoltaic systems, analyzing the reliability of each element of the system and analyzing the entire system.

Finally, this document shows the most important data about reliability of some electrification programs, checking the variety of results subject to different places and different conditions.

As a conclusion, the importance of reliability of stand-alone photovoltaic systems because usually these are located in remote locations, without qualified maintenance and financial resources. These systems operate under dependence of solar radiation and the consumption profile.

Índice

1. Introducción.....	11
1.1 Contexto.....	11
1.2 Situación mundial.....	13
1.3 Situación en Europa.....	15
1.4 Situación en España.....	17
1.5 Energía fotovoltaica.....	19
1.5.1 Razones para elegir energía solar fotovoltaica.....	21
1.5.2 Inconvenientes.....	22
1.5.3 Aplicaciones.....	23
1.5.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados a red.....	23
1.5.3.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos.....	24
1.5.4 Elementos que componen un sistema fotovoltaico.....	26
1.5.4.1 Paneles fotovoltaicos.....	26
1.5.4.2 Baterías.....	29
1.5.4.3 Reguladores de carga.....	32
1.5.4.4 Inversor.....	36
1.5.4.5 Cableado.....	37
1.5.4.6 Cargas (Lámparas).....	37
1.5.4.7 Protecciones y seguridad.....	39
2. Teoría de fiabilidad.....	41
2.1 Evolución histórica de la fiabilidad.....	41
2.2 Definición fiabilidad.....	42
2.3 Parámetros principales y definición de fallo.....	43
2.4 Funciones de distribución.....	46
2.4.1 Distribución normal.....	46
2.4.2 Distribución exponencial.....	48
2.4.3 Distribución de Weibull.....	50

2.5 Teoría de sistemas.....	53
2.5.1 Conexión en serie.....	53
2.5.2 Conexión en paralelo.....	54
2.6 Resumen teórico.....	54
3. Fiabilidad de un sistema fotovoltaico autónomo.....	56
3.1 Definición de sistema autónomo.....	56
3.1.1 Esquema eléctrico del sistema fotovoltaico.....	57
3.1.2 Esquema de fiabilidad del sistema.....	57
3.2. Fases y pasos ante la probabilidad de fallo en un sistema.....	58
3.3 Modos de operación del sistema.....	60
3.4 Clasificación temporal de los fallos de un sistema.....	61
3.5 Clasificación de costes en la instalación de un sistema fotovoltaico.....	63
3.6 Seguridad en un sistema fotovoltaico.....	65
3.7 Fiabilidad del sistema y de sus diferentes elementos.....	65
3.7.1 Fiabilidad del módulo fotovoltaico.....	65
3.7.1.1 Explicación general. Array fotovoltaico.....	65
3.7.1.2 Garantías y valores típicos. Procesos de test.....	67
3.7.1.3 Principales causas de fallo en un módulo solar.....	69
3.7.1.4 Diagrama de bloques de fallo del módulo fotovoltaico.....	71
3.7.1.5 Mantenimiento del módulo fotovoltaico.....	71
3.7.1.6 Análisis matemático.....	71
3.7.1.7 Influencia de la temperatura en los módulos.....	77
3.7.2 Fiabilidad de una batería.....	78
3.7.2.1 Explicación general.....	78
3.7.2.2 Principales causas de fallo en una batería.....	79
3.7.2.3 Diagrama de bloques de fallo en la batería.....	80
3.7.2.4 Recomendaciones en la colocación de baterías.....	80
3.7.2.5 Mantenimiento en las baterías.....	81
3.7.2.6 Influencia de la temperatura en las baterías.....	82
3.7.2.7 Datos reales de fiabilidad.....	82

3.7.3 Fiabilidad del regulador de carga.....	83
3.7.3.1 Explicación general.....	83
3.7.3.2 Principales causas de fallo en un regulador de carga.....	84
3.7.3.3 Diagrama de bloques de fallo en el regulador de carga.....	87
3.7.3.4 Mantenimiento en los reguladores de carga.....	87
3.7.3.5 Datos reales de fiabilidad.....	88
3.7.3.6 Seguridad en el regulador de carga.....	88
3.7.4 Fiabilidad del inversor.....	89
3.7.4.1 Explicación general.....	89
3.7.4.2 Principales causas de fallo en el inversor.....	89
3.7.4.3 Influencia de la temperatura en el inversor.....	90
3.7.4.4 Mantenimiento en el inversor.....	90
3.7.4.5 Seguridad en el inversor.....	91
3.7.5 Fiabilidad en el cableado y conectores.....	91
3.7.5.1 Principales causas de fallo en el cableado y conectores.....	91
3.7.5.2 Diagrama de bloques de fallo del cableado.....	92
3.7.5.3 Seguridad en el cableado.....	92
3.7.5.4 Mantenimiento del cableado y los conectores.....	93
3.7.6 Fiabilidad de las cargas (Lámparas).....	93
3.7.6.1 Principales causas de fallo en las cargas.....	93
3.7.6.2 Datos reales de fiabilidad.....	93
3.7.7 Fiabilidad final de un sistema fotovoltaico autónomo.....	93
4. Aplicaciones y experiencia.....	97
4.1 Aplicación primera.....	97
4.2 Aplicación segunda.....	98
4.3 Aplicación tercera.....	99
5. Conclusiones.....	104
6. Bibliografía.....	106

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

La disponibilidad de energía en el mundo se ha convertido en un problema crucial, dado que las sociedades, sin importar el nivel de desarrollo en el que se encuentren, se ven afectadas por las crecientes demandas requeridas para satisfacer sus necesidades.

La producción de energía eléctrica y su consumo son vitales en la sociedad actual, por tanto, la oferta de energía está sufriendo una transición, empezando desde su inicial dependencia de los hidrocarburos hacia aplicaciones energéticas más diversificadas, lo cual implica un mayor aprovechamiento de las diferentes fuentes de energía renovables de las que disponemos.

El rápido cambio climático el cual está caracterizando las últimas décadas está fuertemente relacionado con el impacto de actividades humanas en el medioambiente, y en particular con las emisiones de CO₂. Tanto por razones económicas (escasez de hidrocarburos) y más importante aún, por razones ecológicas (alteraciones de la atmósfera y el suelo), es vital el desarrollo de fuentes renovables, alternativas menos agresivas con el ambiente, ya que el consumo global no puede mantenerse indefinidamente sin amenazar su propia existencia.

Estas razones explican la creciente demanda de las energías renovables.

El suministro total de energía en el mundo prácticamente se ha duplicado entre 1973 y los últimos años, reduciéndose de manera significativa el porcentaje de aportación del petróleo y aumentando la contribución de la energía nuclear, el gas natural, el carbón y las energías renovables (en las que la biomasa tradicional tiene todavía una importancia muy destacada).

Se encuentran numerosas definiciones de las fuentes renovables en la bibliografía técnica, incluyendo la siguiente: **la energía renovable es la que se deriva de procesos naturales que se reponen constantemente.**

Podemos clasificar los productos renovables junto con los desechos en tres grupos principales:

- Grupo I incluye los productos que necesitan transformarse en electricidad para captarse (como la hidroelectricidad o la solar fotovoltaica).
- Grupo II incluye los productos que, una vez que existen, pueden tener múltiples usos en los sectores de la transformación y consumo final (como la geotermia o la térmica solar); por su naturaleza, estos productos no pueden almacenarse en un sentido convencional y, por lo

tanto, son productos para los cuales no se puedan reportar datos sobre cambios en las existencias.

- Grupo III incluye productos que existen y se usan para múltiples propósitos en los sectores de la transformación y consumo final (como los desechos, la leña, el biogás y los biocombustibles líquidos); por su naturaleza, sí pueden almacenarse en un sentido convencional, y sí son productos para los cuales se pueden reportar datos sobre los cambios en sus existencias.

Los desechos son un combustible compuesto de muchos materiales que provienen de desechos combustibles industriales, institucionales, hospitalarios y familiares, como caucho, plásticos, aceites fósiles desechados y otros productos similares. Pueden estar en forma sólida o líquida, ser renovables o no-renovables, biodegradables o no biodegradables.

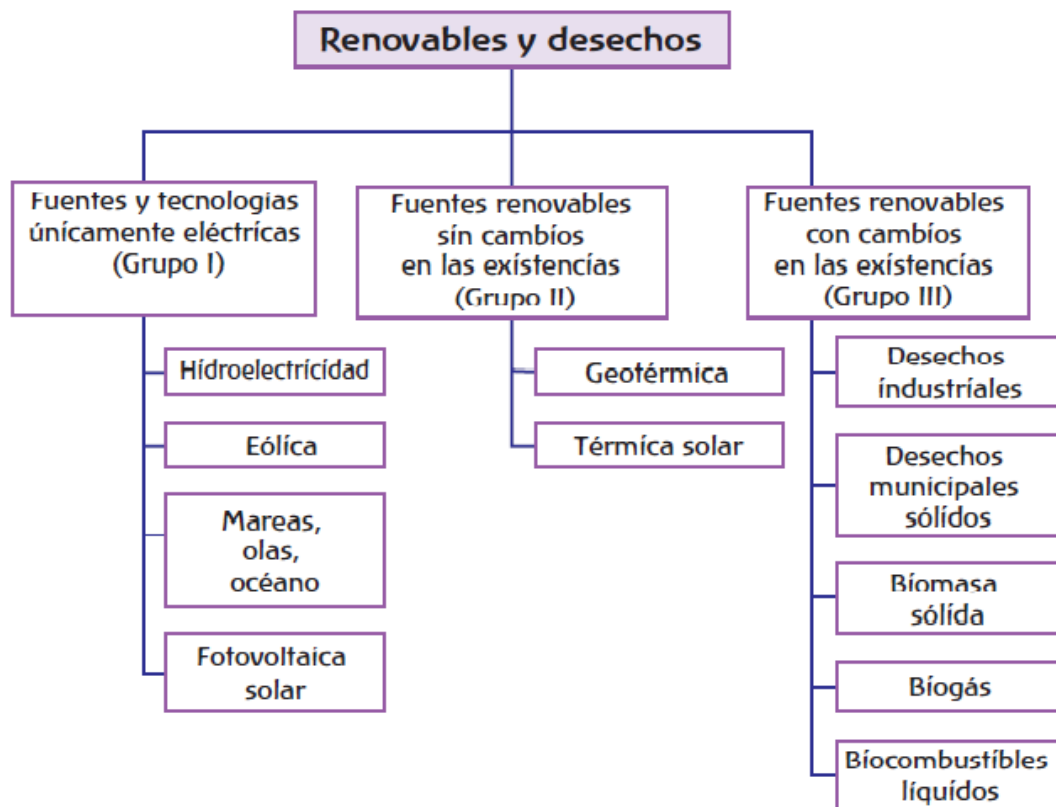


Figura 1: Clasificación energías renovables

La importancia del uso de las energías renovables lo encontramos en que son **fuentes de energía inagotables** para el hombre, algo que a día de hoy empieza a ser notablemente valorado, y por ello su puesta en marcha ha crecido de forma exponencial en los últimos años, como es el caso de la energía solar y eólica.

Otra razón de peso para el uso de este tipo de energías es que tienen un **escaso impacto medioambiental**; no generan residuos como ocurre con la energía nuclear. Por ello se las conoce como energías limpias.

1.2 Situación mundial

A principios del siglo XIX el 95 por 100 de la energía primaria que se consumía en el mundo procedía de fuentes renovables. Un siglo después tal porcentaje era del 38 por 100, y a principios del presente siglo era sólo del 16 por 100. Sin embargo, la tendencia parece estar cambiando, ya que en muchos países industrializados la proporción de energías renovables ha crecido de manera considerable en las dos últimas décadas. La inversión total en el mundo en energías renovables, que en el año 2004 fue de 22.000 millones de dólares USA, ha crecido de manera espectacular, pasando a 130 en 2008, 160 en 2009 y 211 en 2010. Aproximadamente la mitad de los 194 GW estimados de nueva capacidad eléctrica añadidos en el mundo en 2010 corresponde a energías renovables. A principios de 2011 al menos 118 países tenían políticas de apoyo a las energías renovables o algún tipo de objetivo o cuota a nivel nacional, muy por encima de los 55 países que los tenían en 2005.

En la siguiente tabla podemos ver los países líderes mundiales en capacidad instalada por diferentes tipos de fuente energética a comienzos del año 2011:

	Capacidad instalada en renovables (sin hidro.)	Capacidad instalada en renovables (con hidro.)	Capacidad instalada energía eléc. eólica	Capacidad instalada energía eléc. biomasa	Capacidad instalada energía eléc. geo-térmica	Solar foto-voltaica	Energía solar para calor y agua caliente
1	EEUU	China	China	EEUU	EEUU	Alemania	China
2	China	EEUU	EEUU	Brasil	Filipinas	España	Turquía
3	Alemania	Canadá	Alemania	Alemania	Indonesia	Japón	Alemania
4	España	Brasil	España	China	México	Italia	Japón
5	India	Alemania/India	India	Suecia	Italia	EEUU	Grecia

Figura 2: Cinco países líderes mundiales en cuanto a capacidad instalada (2011)

En China, el Plan de Desarrollo de Energías Renovables estableció que el uso de dichas energías tenía que alcanzar un 10 por 100 del total en 2010 y un 20 por 100 en 2020. Actualmente China es el país con mayor capacidad instalada total en energías renovables, y también ocupa este puesto en energía eólica y en energía solar para calefacción y agua caliente. Además, en 2010, China ha sido el país del mundo que más inversión nueva ha realizado en energías renovables.

Como se observa España también ocupa buen lugar especialmente en el sector fotovoltaico. Más tarde se analizará más en detalle esta información sobre España.

La estructura de la energía primaria (entendemos por fuente de energía primaria aquella que procede directamente del medio natural) por tipos de fuentes es muy distinta según se analiza la situación del mundo en su conjunto o sólo en los países más desarrollados económicamente. El siguiente cuadro permite realizar dicha comparación con los datos más actuales disponibles, así como la evolución del peso de las distintas fuentes energéticas desde el año 1973.

Se puede observar también cómo tras los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) el siguiente grupo en importancia es el que la Agencia Internacional de la Energía (IEA: International Energy Agency) denomina biomasa y residuos, que comprende biomasa sólida, biomasa líquida, biogás, residuos industriales y residuos urbanos.

Tipo de combustible	Mundo, 1973	Mundo, 2009	OCDE, 1973	OCDE, 2010
Petróleo	46,0	32,8	52,6	36,3
Carbón	24,6	27,2	22,6	20,2
Gas natural	16,0	20,9	18,9	24,5
Biomasa y residuos	10,6	10,2	2,3	4,7
Nuclear	0,9	5,8	1,3	11,0
Hidroeléctrica	1,8	2,3	2,1	2,1
Geotérmica/solar/eólica	0,1	0,8	0,2	1,2
Total	100	100	100	100
En Mtep	6.111	12.150	3.741	5.413

FUENTE: IEA (2011c).

Figura 3: Estructura de energía primaria (en porcentajes)

Comparando los datos de energía primaria en todo el mundo entre 1973 y 2009 se observa que:

El suministro total de energía prácticamente se ha duplicado entre 1973 y 2009, pasando de 6.111 a 12.150 Mtep (millones de toneladas equivalentes de petróleo).

Se ha reducido de manera significativa la aportación del petróleo, pasando de un 46 por 100 en 1973 al 32,8 por 100 en 2009.

El peso del grupo biomasa y residuos desciende muy ligeramente.

Aumenta la aportación de la energía nuclear, el gas natural, el carbón, y las energías limpias.

En el caso de los países que forman la OCDE, se observa que el suministro total de energía se ha incrementado un 38,2 por 100 en el período analizado,

pasando de 3.741 Mtep en 1973 a 5.170 Mtep en 2009, bastante menos que a nivel mundial. En el grupo de biomasa y residuos, se observa, por un lado, que en la OCDE el porcentaje es bastante menor que en el mundo en su conjunto y, por otro, que a diferencia de lo que ocurre a nivel mundial, en la OCDE el peso de estos combustibles ha crecido pasando del 2,3 por 100 en 1973 al 4,7 por 100 en 2010.

Recordemos que los países miembros originales de la **OCDE** son Austria, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Francia, Alemania, Grecia, Islandia, Irlanda, Italia, Luxemburgo, los Países Bajos, Noruega, Portugal, España, Suecia, Suiza, Turquía, el Reino Unido y los Estados Unidos. Los siguientes países se hicieron Miembros posteriormente, ingresando en las fechas indicadas a continuación: Japón (28 abril 1964), Finlandia (28 enero 1969), Australia (7 junio 1971), Nueva Zelanda (29 mayo 1973), México (18 mayo 1994), la República Checa (21 diciembre 1995), Hungría (7 mayo 1996), Polonia (22 noviembre 1996), la República de Corea (12 diciembre 1996) y Eslovaquia (28 septiembre 2000).

1.3 Situación en Europa

La siguiente tabla es muy esclarecedora para observar que evolución están teniendo las fuentes renovables en el ámbito europeo:

	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	Cambio %
Petróleo	180	173	161	166	156	145	133	121	120	112	104	-42
Gas	203	208	208	204	200	203	189	179	167	168	153	-25
Nuclear	243	244	253	256	257	260	258	255	241	242	231	-5
Carbón	224	213	211	210	207	201	195	191	185	177	165	-26
Renovables	93	97	100	97	104	111	115	122	133	141	148	+59
Total	943	935	933	933	924	920	890	868	846	840	801	-15

FUENTE: Elaboración propia, a partir de EUROSTAT (2011).

Figura 4: Producción anual de energía primaria por fuente energética en la UE (en METP; millones equivalentes de toneladas de petróleo)

Podemos afirmar a la vista del gráfico que la producción total de energía primaria en la UE se ha reducido un 15 por 100 entre 1999 y 2009. De todas las fuentes de energía, sólo las energías renovables han incrementado su producción en la última década, y lo han hecho en un 59 por 100. Este dato es bastante relevante, pues corrobora el crecimiento de este tipo de fuentes.

En la UE el petróleo es el combustible que más ha visto disminuir su producción en la última década, con un 42 por 100. Le siguen el carbón (26 por 100) y el gas (25 por 100).

En 2009, el reparto de la producción energética europea según sus fuente queda de la siguiente forma: nuclear (28,8 por 100), carbón (20,6 por 100), gas (19 por 100), renovables (18,5 por 100), petróleo (13 por 100).

La UE lleva años adoptando una postura muy activa a favor de las energías renovables y estableciendo objetivos temporales de exigencia creciente. A partir del año 2009 entró en vigor la **nueva Directiva Europea** que obligó a los países que forman parte de la Unión Europea a intentar conseguir que el 20% de la energía sea renovable. Esta directiva tiene por objeto reducir las emisiones de dióxido de carbono, aumentar la eficiencia energética y las energías renovables antes del año 2020.

Así, en varios países como Francia, Italia, Alemania, Japón, Corea del Sur y Estados Unidos el número de instalaciones de energía solar se ha incrementado notablemente a una velocidad considerable. Para muestra, en el siguiente gráfico se observa la evolución mundial de la energía solar:

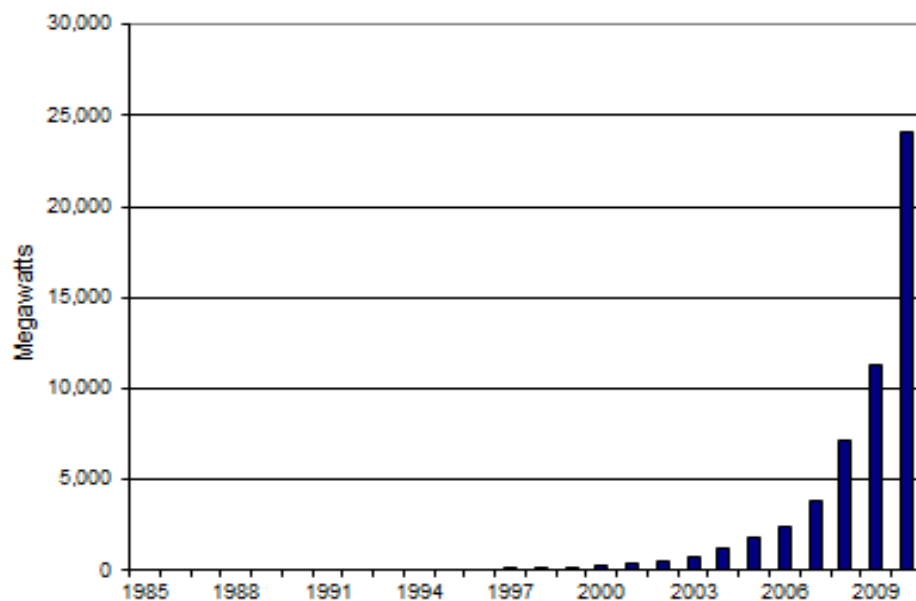


Figura 5: Evolución mundial de potencia instalada procedente de la energía solar (1985-2010)

La producción de electricidad renovable en la UE en 2010 fue de 661,4 TWh (un 12,75 por 100 más que en 2009).

La previsión para el periodo 2012-2030 es que las energías renovables continúen creciendo a razón de 1,7% anual. Estas energías se beneficiarán, en principio, del mantenimiento de los altos precios de los combustibles fósiles, y de su atractivo como fuentes de energías poco contaminantes. De hecho, son muchos los gobiernos que están llevando a cabo políticas de fomento de las energías renovables, incluso en situaciones en las que no podrían competir con los combustibles fósiles debido a su rentabilidad.

El mundo de las energías renovables y más específicamente de la energía solar fotovoltaica representa un mercado bastante maduro, que cada vez va a más generando beneficios e impulsando al consumidor hacia el uso de estas tecnologías. De hecho, en los últimos años las empresas de energía fotovoltaica han alcanzado un crecimiento de producción anual de entorno al 40%. Si hablamos de Europa, aproximadamente 70.000 actualmente personas trabajan de alguna forma relacionada con este sector, donde destaca por encima de todos los países Alemania y España.

1.4 Situación en España

España está entre las cinco principales naciones inversoras en energías renovables en el ámbito internacional y su mercado fotovoltaico fue el que más creció en todo el mundo en 2007, tal como se observa en el primer gráfico, de manera que en España están dos de las tres principales plantas fotovoltaicas del planeta.

Según el Plan de Fomento de las Energías Renovables (2000-2010), el objetivo de España para el año 2010 era la cobertura del 29,4% de la demanda de energía eléctrica mediante fuentes renovables, objetivo alcanzado con creces pues ese año se alcanzó el 35%, como se puede observar en la siguiente gráfica donde la tónica es creciente:

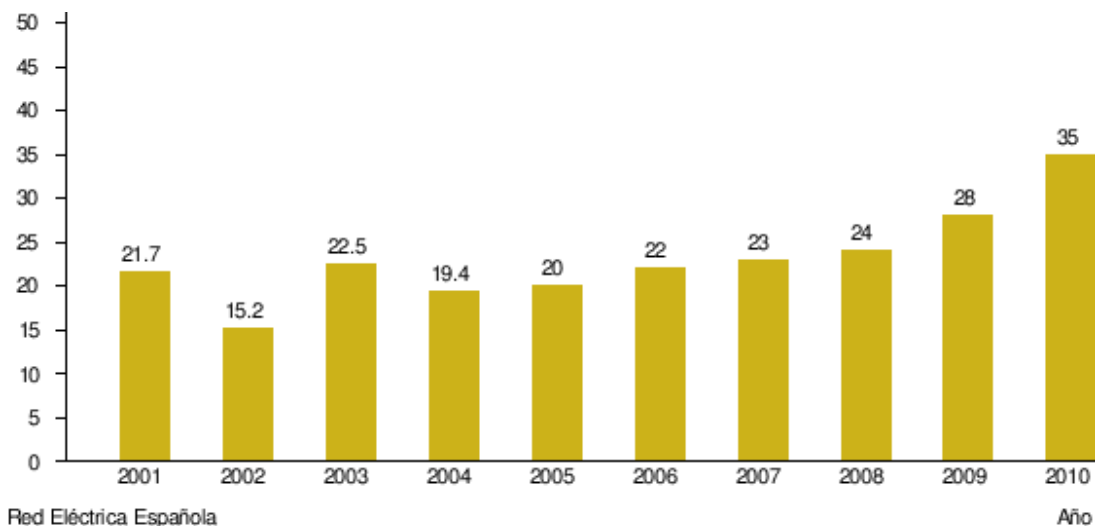


Figura 6: Porcentaje de cobertura de electricidad de las energías renovables en España (2001-2010)

En 2010, en cuanto a la energía demandada en España desglosada en los diferentes tipos de fuentes de energía, los datos confirman el papel importante y creciente que toman las energías renovables en España:

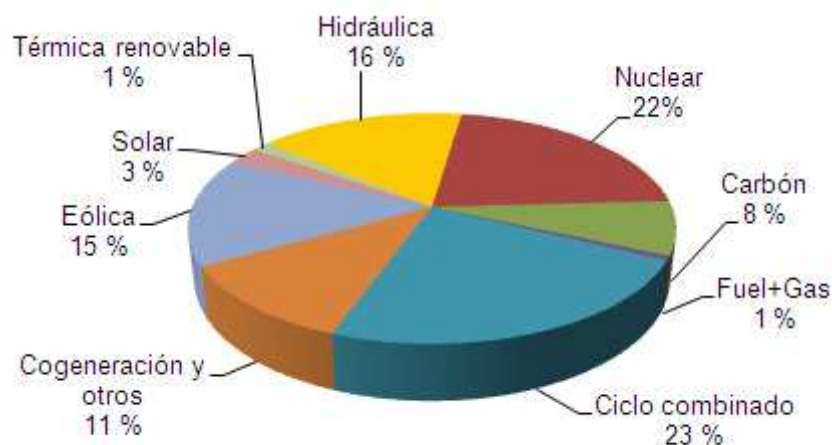


Figura 7: Desglose de porcentajes de energía demandada en España

España prevé que en 2020 la participación de las renovables en nuestro país será del 22,7% sobre la energía final y un 42,3% de la generación eléctrica. Este superávit podrá ser utilizado, a través de los mecanismos de flexibilidad previstos en la Directiva de renovables, para su transferencia a otros países europeos que resulten deficitarios en el cumplimiento de sus objetivos.

Las estimaciones han sido informadas a la Comisión Europea en cumplimiento de la Directiva de Energías renovables recientemente aprobada. La aportación de las energías renovables al consumo final bruto de energía en España se estima para el año 2020 en un 22,7%, casi tres puntos superior al objetivo obligatorio fijado por la Unión Europea para sus estados miembros, mientras que la aportación de las renovables a la producción de energía eléctrica alcanzará el 42,3%, con lo que España también superará el objetivo fijado por la UE en este ámbito (40%).

Los datos están contenidos en el anticipo del Plan de Renovables 2011-2020, enviado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio a la Comisión Europea en cumplimiento de la propia directiva comunitaria sobre la materia, que contempla objetivos obligatorios de energías renovables para la UE y para cada uno de los Estados miembros en el año 2020, y la elaboración por parte de éstos de planes de acción nacionales para alcanzar dichos objetivos.

CONSUMO FINAL DE ENERGÍAS RENOVABLES (en ktep)	2008	2012	2016	2020
Energías renovables para generación eléctrica	5.342	8.477	10.682	13.495
Energías renovables para calefacción/refrigeración	3.633	3.955	4.740	5.618
Energías renovables en transporte	601	2.073	2.786	3.500
Total en Renovables en ktep	9.576	14.504	18.208	22.613
Total en Renovables según Directiva	10.687	14.505	17.983	22.382

CONSUMO DE ENERGÍA FINAL (en ktep)	2008	2012	2016	2020
Consumo de energía bruta final	101.918	93.321	95.826	98.677
% Energías Renovables/Energía Final	10.5%	15.5%	18.8%	22.7%

Figura 8: Consumo español de Renovables y su aportación en la Energía Final

No obstante, a día de hoy España ha dado un paso hacia atrás en la estimulación de este tipo de energía limpia. Esto se debe a que el Gobierno ha aprobado un decreto ley en materia energética, que suspende los incentivos económicos tanto a los nuevos proyectos de energías renovables, como a la producida a partir de residuos.

El Gobierno aseguró que la medida se aplicará con carácter temporal y justificó su aplicación a la necesidad de contribuir desde todos los ámbitos a reducir el déficit público. La crisis económica y la situación del sistema eléctrico, que arrastra un elevado y creciente déficit de tarifa que amenaza su sostenibilidad, son las dos justificaciones para la aplicación de la medida.

1.5 Energía fotovoltaica

Dentro de las variadas fuentes naturales de energía existentes, el sol es una fuente inagotable de recursos para el hombre. Provee energía limpia, abundante y disponible en la mayor parte de la superficie terrestre, puede por lo tanto suministrarnos la energía necesaria evitando problemas ambientales derivados de procesos convencionales del tratamiento de los recursos, como el petróleo, centrales nucleares y otras alternativas energéticas.

Por tanto la energía fotovoltaica consiste en producir energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol. Esta radiación se capta por medio de diferentes tecnologías (células fotovoltaicas, helióstatos, colectores térmicos) que pueden transformarla en energía eléctrica o térmica.

La célula solar es un dispositivo que convierte la radiación solar en energía eléctrica de manera directa, es decir, no requiere de piezas móviles o procesos de combustión. El efecto fotovoltaico, es decir, convertir la luz solar en electricidad, se produce en materiales conocidos como semiconductores, las cuales son materiales cuya conductividad puede ser modificada, y además generar una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas.

El efecto fotovoltaico fue descubierto en 1838 por el físico experimental francés Edmund Becquerel, mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de dos electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica, en donde esta pila aumentaba su generación de electricidad cuando era expuesta a la luz solar. A fines del siglo XIX, se descubre la fotoconductividad del selenio y se construye la primera celda experimental hecha de una oblea de selenio. En el año 1941 se construye la primera celda, la cual fue fabricada de selenio y tenía una eficiencia del 1%. La compañía Western Electric, fue la primera en comercializar celdas solares en 1955.

La **irradiancia** se define como la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética, en este caso, de la radiación proveniente del sol.

La potencia de la radiación o irradiancia proveniente del sol varía según el momento del día, el mes del año y las condiciones atmosféricas que se dan en una determinada región, ya que la tierra describe una trayectoria alrededor del sol que hace que la inclinación con la que inciden los rayos solares sobre la superficie terráquea varíe a lo largo del día, del año y de las estaciones. Sabemos, por ejemplo, que la energía media diaria incidente sobre la superficie terrestre en nuestra latitud es de 5kWh por metro cuadrado.

En las siguientes fotos se puede ver los distintos valores medios anuales de irradiancia en distintas zonas de Europa.

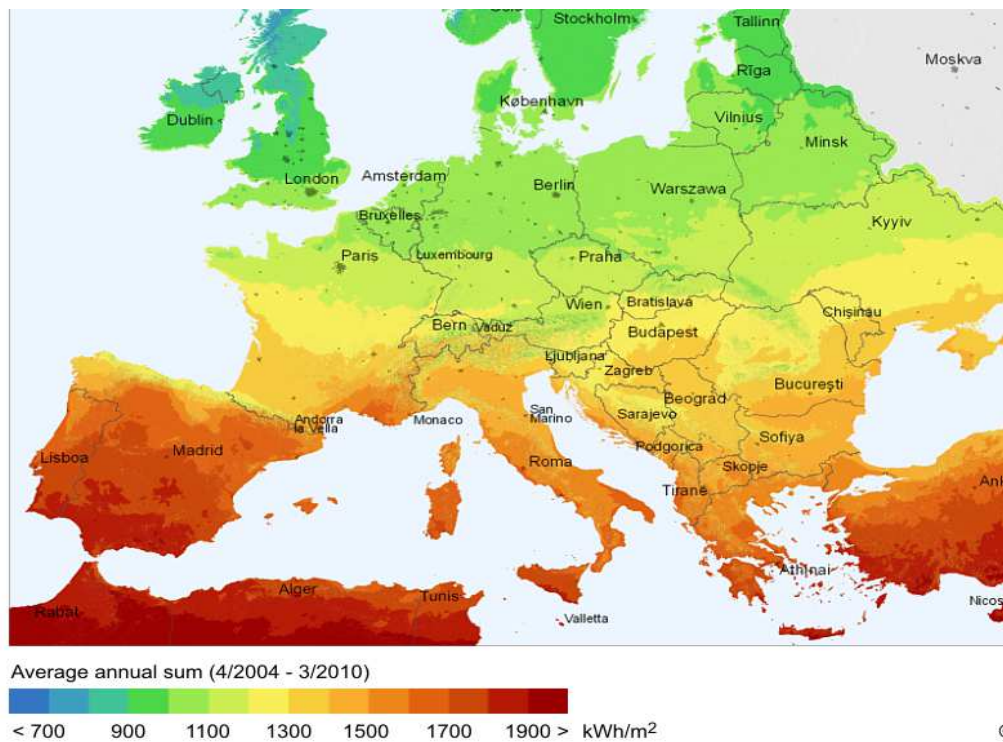


Figura 9: Irradiancia media europea

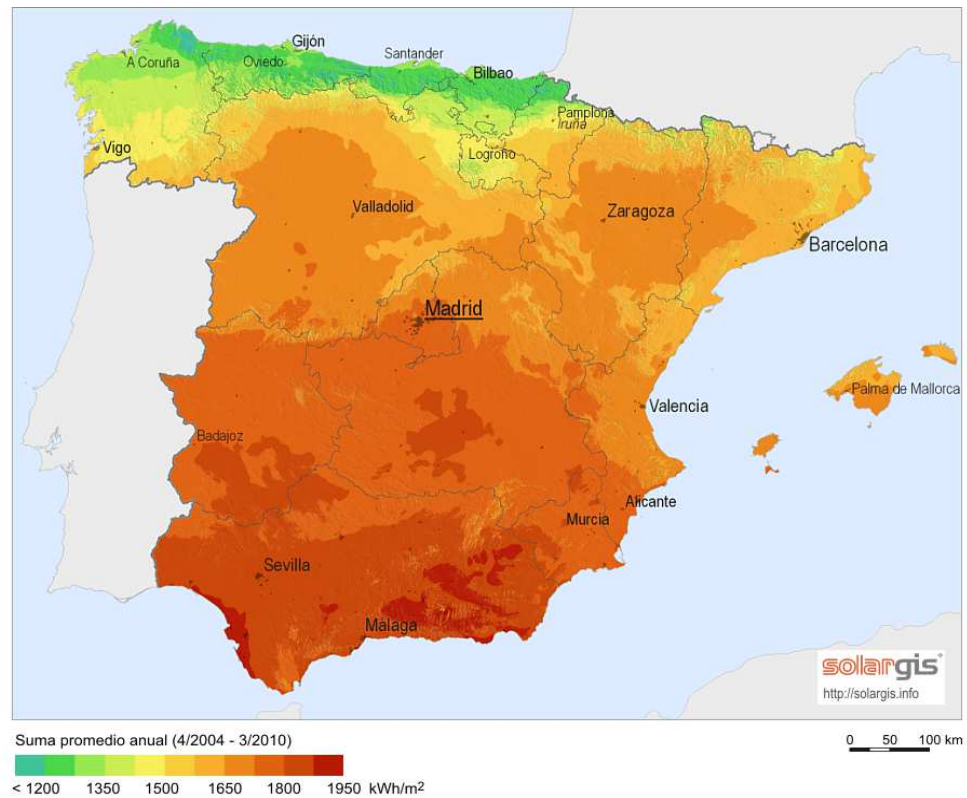


Figura 10: Irradiancia media en España

La potencia fotovoltaica total conectada a red en España a Marzo de 2012 es de 4.243 MW, con un total de 57.718 instalaciones fotovoltaicas inscritas en el Registro de Instalaciones de Producción en Régimen Especial.¹

En cuanto a la evolución de los últimos años de la energía fotovoltaica, en la siguiente imagen se puede observar la tónica que ha seguido la energía fotovoltaica en España y que corrobora lo comentado:

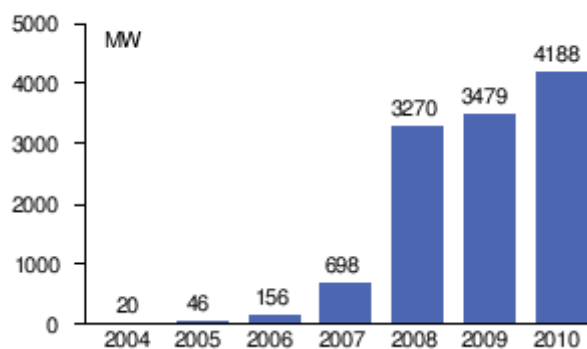


Figura 11: Potencia solar instalada en España (2004-2010)

1.5.1 Razones para elegir energía solar fotovoltaica

- Simplicidad: Generación de electricidad directamente a partir de la luz del sol.
- Versatilidad: Un sistema fotovoltaico siempre va a poder ampliarse con nuevos elementos.
- Duración: Los módulos fotovoltaicos están pensados para resistir todo tipo de fenómenos ambientales adversos. Los fabricantes garantizan los paneles por periodos de 20 a 40 años, incluyendo la producción y el rendimiento del módulo.
- Seguridad: En un sistema fotovoltaico, no hay riesgos que puedan afectar a personas o el entorno. No existen elementos nocivos o inflamables, no atraen rayos. Los inversores que conectan el sistema con la red eléctrica poseen dispositivos de seguridad que los hacen fiables.
- El Silicio, elemento base para la fabricación de las células fotovoltaicas, es muy abundante, no siendo necesario explotar yacimientos de forma intensiva
- Prácticamente se produce la energía con ausencia de ruidos.

1.5.2 Inconvenientes

- Impacto en el proceso de fabricación de las placas: Extracción del Silicio, fabricación de las células.
- Explotaciones conectadas a red: Necesidad de grandes extensiones de terreno Impacto visual.

Para evitar posibles daños ambientales, las industrias de módulos solares, han iniciado algunas actividades para promover la recogida y posterior reciclado de estos componentes. Algunas empresas ya han ejecutado un plan piloto para el reciclaje de las células solares de silicio cristalino y de los módulos. El proceso parte con un proceso de recuperación, donde se queman los polímeros de la lámina del módulo, para luego ser sometidos a un proceso de grabado químico para eliminar la metalización, de revestimiento antireflexión y unión pn. El producto resultante puede ser reprocesado en los procesos estándares de células solares.

Otra manera de facilitar la recuperación de las células solares, consiste en añadir una capa adicional de polímero con una baja adhesión tanto para la

célula como para el laminado. La única desventaja, consiste en que se aumentan los efectos ópticos disminuyendo la eficiencia del modulo solar.

1.5.3 Aplicaciones

La energía solar se puede dividir en dos tipos según su suministro y/o aplicación:

- Sistemas fotovoltaicos conectados a la red
- Sistemas fotovoltaicos autónomos o aislados de la red:



Figura 12: Aplicaciones energía solar fotovoltaica

1.5.3.1 Sistemas fotovoltaicos conectados a red

En el caso de los sistemas fotovoltaicos conectados a la red, la electricidad que proviene de la célula fotovoltaica es transformada en corriente alterna por medio del inversor y así inyectada a la red, para su posterior consumo. Por tanto el objetivo es inyectar la mayor cantidad posible a la red.

Actualmente, en países como España, Alemania o Japón, las compañías de distribución eléctrica están obligadas por ley a comprar la energía inyectada a su red por estas centrales fotovoltaicas.

Su esquema típico es el siguiente:

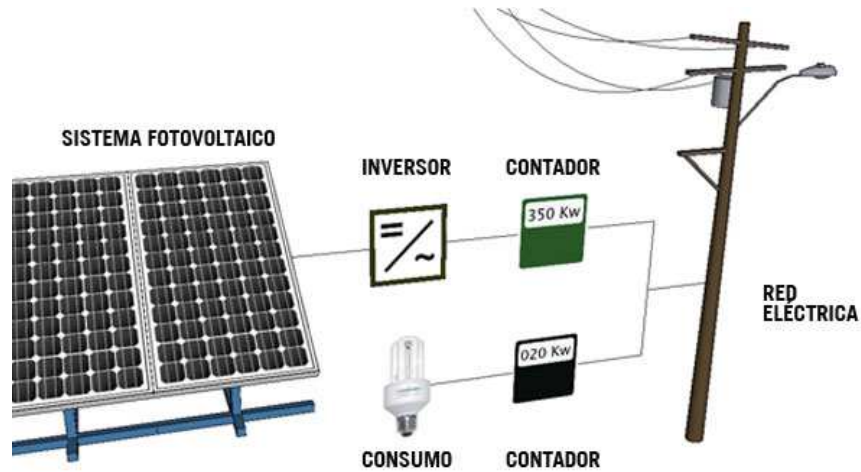


Figura 13: Sistema fotovoltaico conectado a la red

Como se puede observar en este conexionado, la corriente continua generada en el módulo fotovoltaico se transforma en corriente alterna para a continuación entregarla en la red eléctrica.

1.5.3.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos

En el caso de los sistemas fotovoltaicos autónomos, la energía eléctrica es almacenada en baterías, y por medio del regulador se controla la carga y descarga de éstas. El objetivo de este tipo de sistemas es tener la mayor disponibilidad posible de energía para una determinada demanda.

Es por tanto necesario dimensionar la instalación de manera que durante el periodo de insolación permita la carga de la batería y a su vez sea capaz de alimentar las cargas conectadas al sistema.

De esta manera, podemos aprovechar la energía en casas de campo, refugios de montaña, bombeos de agua, instalaciones ganaderas, sistemas de iluminación o balizamiento, sistemas de comunicaciones. Concretamente, son muy utilizados para proveer electricidad a sitios lejanos, que por su ubicación geográfica y dificultad de acceso no compensa pagar el coste de la conexión a la red convencional.

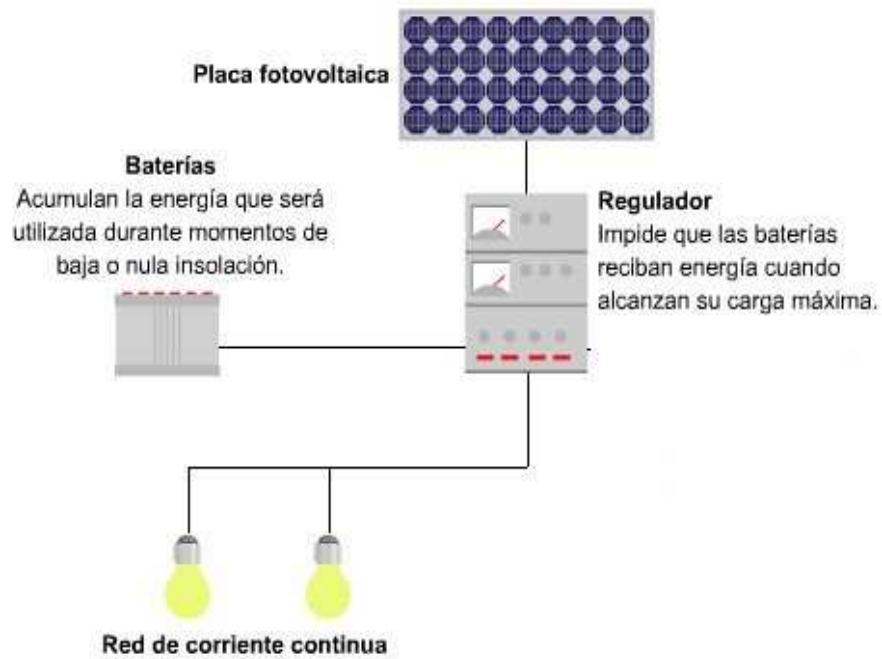


Figura 14: Sistema fotovoltaico autónomo

Dentro de los sistemas fotovoltaicos autónomos, podemos encontrarnos con varias fuentes generadoras de energía, es decir, con la combinación de dos tipos de generadores de energía como por ejemplo un módulo fotovoltaico y un generador diesel. A este modelado se le conoce como **sistema híbrido**.

La ventaja de este tipo de sistemas es la reducción de costes pues se reducen la colocación de baterías, reguladores y cableado, y se aumenta la disponibilidad, ya que siempre se dispone de energía gracias al grupo diesel.

Su esquema a modo de ejemplo es el siguiente:

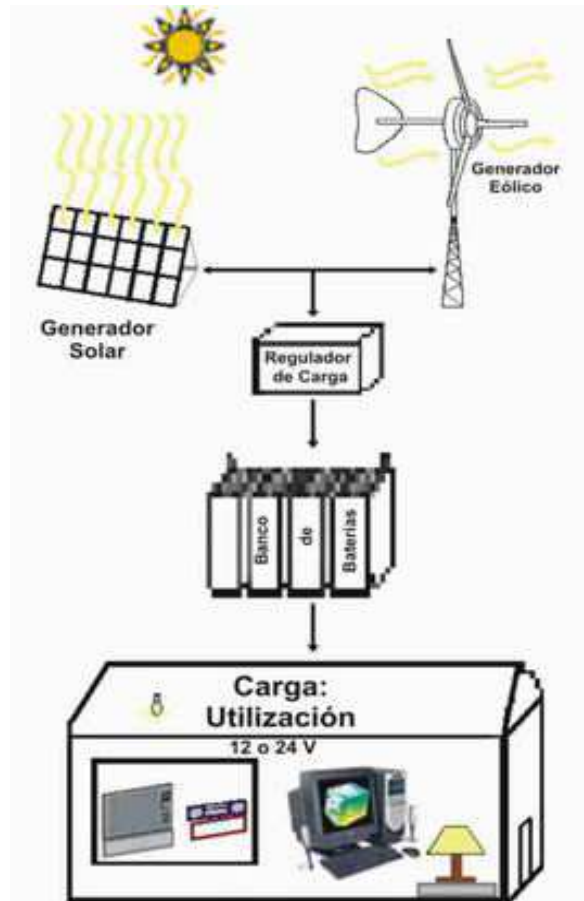


Figura 15: Sistema híbrido

1.5.4 Elementos que componen un sistema fotovoltaico

A continuación se describen y comentan los diferentes elementos que componen un sistema fotovoltaico aislado de la red.

1.5.4.1 Paneles fotovoltaicos

El panel fotovoltaico está compuesto por células fotovoltaicas. El funcionamiento de un panel solar consiste en que algunos de los fotones de la radiación solar, al impactar sobre la primera capa del panel, logran penetrar para luego ser absorbidos por materiales semiconductores, tales como el silicio. Debido a la penetración, los fotones golpean a los electrones (ver figura 16) de los átomos de silicio, lo que provoca que sean liberados de los átomos a los que estaban originalmente confinados. Lo anterior, les permite a los electrones circular por el material y producir electricidad, debido a que las cargas positivas complementarias que se crean en los átomos que pierden electrones, denominadas huecos, permiten que exista un flujo de electrones en el panel solar. Este flujo, es el responsable de la existencia de una corriente continua.

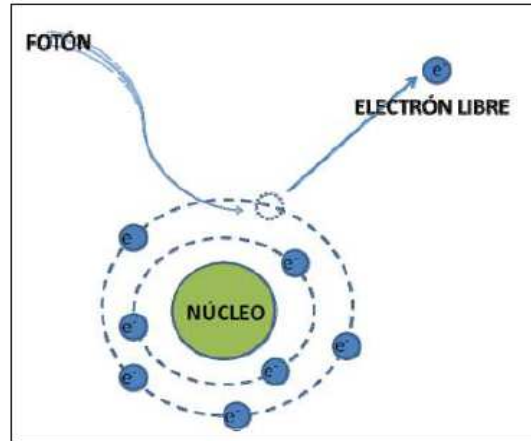


Figura 16: Efecto fotoeléctrico

Sólo una parte de la energía solar recibida por la célula es convertida en electricidad y el resto se pierde. La relación entre la energía solar recibida y la energía eléctrica generada es la **eficiencia de conversión**, o dicho de otro modo, es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida, cuando una célula solar está conectada a un circuito eléctrico. Este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima, P_m , dividido entre la luz que llega a la célula (E , en W/m^2) y el área superficial de la célula solar (A_c en m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{E \cdot A_c}$$

Es de vital importancia la colocación del módulo, es decir, la **orientación y su ángulo de incidencia**. Dependiendo de la localización, se tiene una posición concreta en la que la irradiancia captada es máxima. La conversión de radiación solar en energía eléctrica, es directamente proporcional al ángulo de inclinación que hay en el panel solar con respecto a los rayos solares incidentes. Por lo tanto, a medida que el panel se encuentra perpendicular a estos rayos, la conversión es máxima.

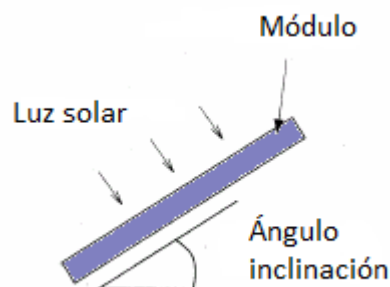


Figura 17: Inclinación y orientación de un módulo fotovoltaico

En una latitud como la de España, la inclinación solar sobre la superficie variará entre 0° y 20° en invierno, y entre los 0° y los 60° en verano. Es por ello necesario optimizar las instalaciones, de manera que se considere en su diseño que el ángulo de los paneles solares adopte una inclinación variable entre los 0° y 60° dependiendo de la estación, y además, garantizar que la orientación este-oeste sea la adecuada, de manera que al amanecer los paneles intercepten la salida del sol, siguiendo su recorrido para acabar la jornada orientados al este, en el ocaso.

Para facilitar la explotación de las instalaciones solares, se ha llegado a una solución de compromiso, en la que se toma un ángulo de referencia de unos **30° y siempre orientando los paneles hacia el sur.**

De todas formas, actualmente el mercado ofrece mecanismos de soportes para generadores fotovoltaicos que incluyen el seguimiento del punto de máxima potencia estacional o diario en uno o dos ejes, los cuales traen consigo un considerable aumento en el rendimiento de una instalación y que termina compensando la inversión inicialmente realizada.

En el panel se agrupan eléctricamente un determinado número de células solares formando una célula de gran tamaño ya que una única célula solar entrega muy poca energía.

Este conjunto de células está envuelto por unos elementos que le confieren protección frente a los agentes externos y rigidez para acoplarse a las estructuras que los soportan. Los elementos son los siguientes:

- Encapsulante: constituido por un material que debe presentar una buena transmisión a la radiación y una degradación baja a la acción de los rayos solares.
- Cubierta exterior de vidrio templado: que además de facilitar al máximo la transmisión luminosa, debe resistir las condiciones climatológicas más adversas y soportar cambios bruscos de temperatura.
- Cubierta posterior: constituida normalmente por varias capas opacas que reflejan la luz que ha pasado entre las células, haciendo que vuelvan a incidir otra vez sobre éstas.
- Marco de metal: normalmente de aluminio, que asegura rigidez y al conjunto, y que lleva los elementos necesarios (generalmente taladros) para el montaje del panel sobre la estructura soporte.
- Caja de terminales: incorpora los bornes para la conexión del módulo.

- Diodo de protección: impiden daños por sombras parciales en la superficie del panel.

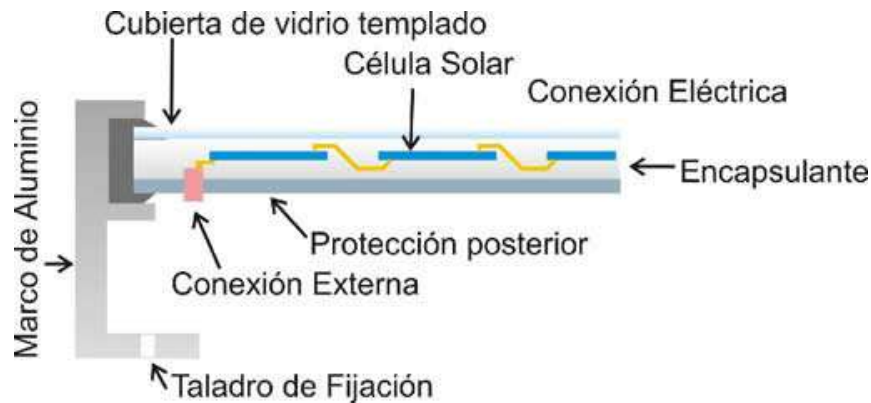


Figura 18: Partes de un módulo fotovoltaico

Según el material con el que están hechas las células fotovoltaicas se pueden clasificar en los siguientes grandes grupos: Células de silicio, células de lámina delgada, células de banda intermedia y células tándem.

En las células de silicio se encuentran en el 90% de las células comerciales. Dado que el silicio es un material abundante y asequible apenas repercute en los costes.

1.5.4.2 Baterías

En un sistema fotovoltaico, existen muchos factores que afectan a la energía captada, como puede ser la irradiación solar o la temperatura ambiente.

Estas variables pueden controlarse mediante el uso de la red eléctrica. Sin embargo, en una instalación autónoma aislada esto no es posible. En tal caso, para suministrar energía cuando los paneles fotovoltaicos no son capaces de hacerlo, se utilizan baterías recargables. Estas baterías se recargan mediante la energía captada en periodos de alta luminosidad para que puedan ser utilizadas por el consumidor cuando se necesite.

La batería consiste en la unión eléctrica de una o varias celdas electroquímicas, en serie o paralelo, con el objetivo de conseguir ciertos valores de tensión y corriente.

La transformación de energía química a energía eléctrica se produce por una reacción oxidación-reducción. En las celdas electroquímicas, el electrodo que ofrece electrones al circuito eléctrico es el ánodo, el cual sufre una oxidación durante el proceso químico, mientras que en el cátodo tiene lugar la reducción donde se reciben los electrones para dar lugar al fluido eléctrico. Llamamos electrolito al medio por el que se transfieren los iones en el interior de la celda electroquímica.

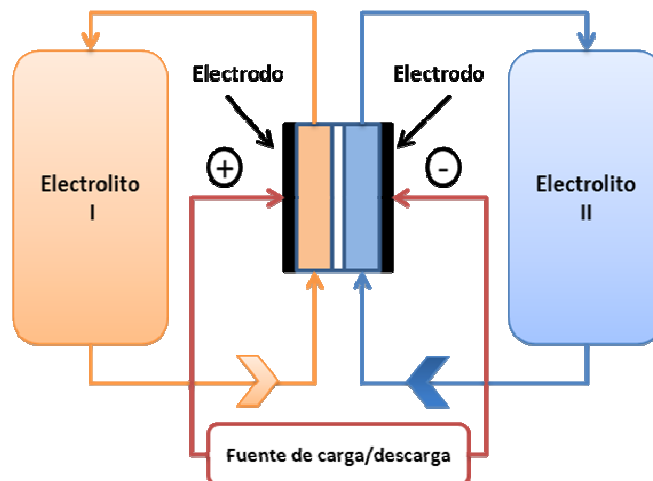


Figura 19: Esquema de una batería

Las celdas electroquímicas y las baterías se clasifican en primarias o secundarias según si son recargables o no recargables:

Las baterías primarias son aquellas que no tienen la capacidad de ser recargadas eléctricamente.

Las baterías secundarias son las conocidas como baterías recargables.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos usan baterías secundarias o recargables.

En la siguiente figura mostramos los diferentes tipos de baterías recargables, incluidos sus valores más útiles:

Tecnología	Ánodo	Cátodo	Tensión nominal (V)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)	Ciclo de vida (ciclos)	Temperatura de trabajo (°C)
ácido-plomo	Pb	PbO ₂	2,0	35	70	200-1.500	-40 a 60
"Edison" (hierro-níquel)	Fe	Ni oxide	1,2	30	55	2.000 - 4.000	-10 a 45
Níquel-cadmio	Cd	Ni oxide	1,2	35	100	500-10.000	-50 a 60
Níquel-zinc	Zn	Ni oxide	1,6	60	120	500	-10 a 50

Níquel-hidrógeno	H ₂	Ni oxide	1,2	55	60	1.500 - 40.000	0 a 50
Níquel-metal hidruro	MH	Ni oxide	1,2	75	240	300-600	-20 a 50
Plata-zinc	Zn	AgO	1,5	105	180	50-100	-20 a 60
Plata-cadmio	Cd	AgO	1,1	70	120	300-800	-25 a 70
Zinc/cloro	Zn	Cl ₂	-	-	-	-	-
Zinc/bromo	Zn	Br ₂	1,6	70	60	-	-
Litio-ion	Li _x C ₆	Li _(1-x) CoO ₂	4,1	150	400	1.000 +	-20 a 50
Litio/dióxido de manganesio	Li	MnO ₂	3,0	120	265	-	-
Litio/disulfuro de hierro	Li(Al)	FeS ₂	1,7	180	350	-	-

Figura 20: Baterías más representativas

Por su uso en sistemas fotovoltaicos, las más representativas son las baterías de plomo-ácido, estacionarias o tubulares, solar modificadas, así como las de electrolítico gelificado, dado su bajo coste y mantenimiento que requieren. Otra ventaja de estas baterías son sus bajos valores de gasificación y una baja auto descarga.

Dentro del grupo de las baterías de plomo-ácido, las baterías más comunes son las de: plomo-antimonio, plomo-selenio y plomo-calcio.

Cuando se usan baterías de Pb-ácido es muy importante mantener la temperatura del electrolito cercana a los 25 °C, ya que a esta temperatura se alcanza el balance óptimo entre la eficiencia y la vida útil de la batería.

La batería es un elemento problemático a la hora de dimensionar sistemas fotovoltaicos autónomos, ya que son bastantes las incertidumbres a las que nos enfrentamos, como por ejemplo la radiación solar, variaciones de temperatura, la demanda eléctrica, tiempos de uso, etc, por tanto resulta muy

difícil definir unas condiciones normales de operación. Esto implica que el rendimiento suele ser diferente al especificado por el fabricante ya que la información que nos ofrecen son datos recogidos bajo unas condiciones determinadas. En este sentido, la capacidad real debe ser considerada como el primer y más importante factor en la fase previa de la instalación. Este parámetro es lo que realmente marca el funcionamiento de la batería.

Como referencia debe tomarse el valor de capacidad nominal especificado por el fabricante y, a partir de él, realizar la comparación con el valor real de capacidad de la batería. Es dicho valor nominal el empleado normalmente en las tareas de dimensionado.

Puede establecerse como límite admisible de funcionamiento una capacidad del 80% de la capacidad nominal.

Normalmente y dado el coste de un reemplazamiento de batería, muchos usuarios alargan más de lo recomendado el uso de la batería, degradando por tanto su capacidad real a expensas de tener por tanto, que reducir el consumo respecto al estimado

Se ha observado a lo largo de la experiencia que muchas instalaciones rurales están sobredimensionadas ya que no se hace una correcta estimación del consumo al que se someterá el sistema fotovoltaico.

El mantenimiento de las baterías resulta vital para su correcto funcionamiento así como su tiempo de vida útil, ya que son un producto perecedero y se deterioran a consecuencia de las acciones químicas que suceden durante el almacenamiento.

Una vez en operación, todas las baterías sufren una progresiva pérdida de capacidad, causado por diferentes procesos de degradación como corrosión, sulfatación, estratificación, etc. El nivel de degradación depende de múltiples factores como el tipo de batería del que estemos hablando, condiciones de operación, regulación y mantenimiento, temperatura, etc, tal como ya se ha comentado.

Una vez retiradas o reemplazadas de la instalación por los motivos mencionados, son tratadas y analizadas para medir y adquirir más datos y experiencia sobre las baterías y las condiciones a las que fueron sometidas con el objetivo de mejorar la eficiencia en este campo.

1.5.4.3 Regulador de carga:

El regulador de carga controla constantemente el estado de carga de las baterías, regulando la intensidad de carga de las mismas para alargar su vida útil; también debe tener la capacidad de generar alarmas en función del estado

de carga de la batería. Por tanto es el encargado de gestionar el sistema fotovoltaico, su puesta en funcionamiento permite un control capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permitiendo la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento.

Los reguladores actuales introducen micro controladores para la correcta gestión del sistema fotovoltaico al que está conectado, su control adaptativo capaz de adaptarse a las distintas situaciones de forma automática, permite también la modificación manual de sus parámetros de funcionamiento para instalaciones especializadas, incluso los hay que memorizan datos que permiten conocer la evolución de la instalación durante un tiempo determinado, mediante el registro y la comparación de los valores de tensión, temperatura, intensidad de carga y descarga, y la capacidad del acumulador.

Si bien el regulador de carga supone un coste de inversión inicial bajo, entre el 5-10% del total de la instalación, su impacto sobre el suministro eléctrico final y sobre el coste de operación del sistema es elevado, básicamente por su influencia sobre la batería. Por tanto, su correcto funcionamiento es de vital importancia.

Los parámetros más importantes a controlar en un regulador de carga que está en operación son:

- Intensidad máxima de carga o de generación: Es la máxima intensidad de corriente procedente de los generadores de electricidad que el regulador puede soportar.
- Intensidad máxima de consumo: Máxima corriente que puede pasar del sistema de regulación al consumo.
- Voltaje final de carga: Es el voltaje de la batería por encima del cual se desconecta la conexión entre el generador fotovoltaico y la batería. Vale aproximadamente 14.1 para una batería de plomo ácido de tensión nominal 12V.
- Voltaje de desconexión: La tensión de desconexión del consumo es la tensión de la batería a partir de la cual se desconectan las cargas del consumo. La desconexión del consumo por bajo voltaje indica que la descarga en la batería esta próxima al 70 %, de su capacidad nominal, esto ocurre para evitar una sobrecarga puntual de corta duración.

Los reguladores lineales se agrupan en dos categorías, **control en serie** y **control en paralelo**. Esta clasificación está relacionada con el paso que toma

la corriente de carga. Tanto en el control en paralelo como en el control en serie, el máximo valor de la corriente de carga está determinado por la diferencia entre el voltaje de salida de los paneles y el de las baterías:

- El regulador serie corta la corriente cuando alcanza el valor establecido, mientras que el regulador paralelo deriva la corriente a una resistencia.
- Otra diferencia es que el regulador en paralelo impide que las variaciones de corriente de carga de la batería aparezcan en el generador fotovoltaico.
- La energía disipada en forma de calor en el regulador en serie aumenta en proporción directa con la carga de la batería, mientras que en el regulador en paralelo disminuye al aumentar la carga.
- El regulador en paralelo tiene mayor rendimiento que el regulador en serie.
- El regulador en paralelo incorpora un elemento más, que evita la rotura del generador en caso de que falte la carga, además de disipar calor. Por lo que para una entrada y salida determinada con carga idéntica, la potencia la potencia entregada por el generador fotovoltaico es mayor que el caso del regulador de carga en serie.

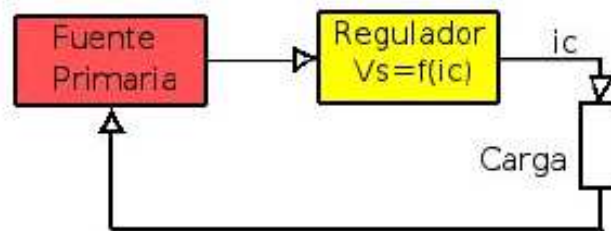


Figura 21: Regulador serie

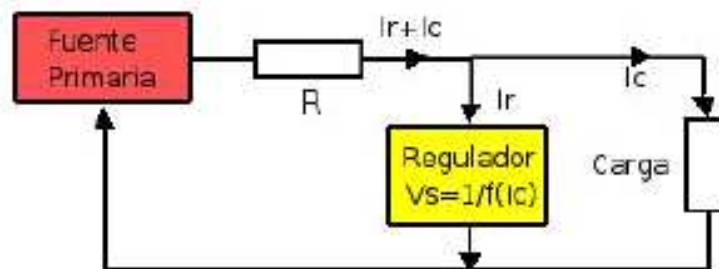


Figura 22: Regulador paralelo

Sus modos de funcionamiento son los siguientes:

Igualación: El regulador de carga permite automáticamente la igualación de cargas de los acumuladores tras un periodo de tiempo en el que el estado de carga ha sido bajo, reduciendo al máximo la gasificación del electrolito en caso contrario.

Carga profunda: Tras la igualación, el regulador de carga permite la entrada de corriente de carga a los acumuladores sin interrupción, hasta que se alcanza el nivel máximo de carga, es entonces cuando interrumpiendo la carga, el sistema de control del regulador pasa a la siguiente fase de flotación. Cuando se alcanza el punto máximo de carga, la batería ha alcanzado un nivel de carga próximo al 90% de su capacidad total, en la siguiente fase de flotación se completará el 100% de la capacidad total de carga de la batería.

Carga final y Flotación: La carga final de la batería se hace en una zona denominada banda de flotación dinámica (BFD), el BFD es el rango de tensión cuyos valores se fijan entre la capacidad total de carga y la tensión nominal de la batería. Una vez alcanzado el voltaje total de carga de la batería, el regulador de corriente inyecta una corriente mínima al sistema, denominada corriente de flotación, tal que permita mantener la batería a plena carga, y en caso de que el sistema consuma energía, se compensa la autodescarga de las baterías.

En la siguiente imagen vemos un ejemplo de regulador y su modo de conexión con los diferentes elementos:



Figura 23: Ejemplo de regulador con su conexión

1.5.4.4 Inversor

El inversor es un dispositivo de potencia encargado de la transformación de la energía continua producida por los módulos solares en energía alterna para consumo, éste debe poseer ciertas características técnicas que eviten inconvenientes de funcionamiento e incompatibilidad con el sistema, debe estar dimensionado y ser capaz de alimentar directamente los consumos que pretendan conectarse al sistema. Por tanto, la colocación o no del inversor en un sistema energético autónomo está sujeto al tipo de cargas de consumo que se coloquen.

Un inversor simple consta de transistor controlado por oscilación, el cual es utilizado para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada, esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola un poco más una onda sinusoidal y produciendo el voltaje de salida necesario. La forma de onda de salida de un inversor ideal debería ser sinusoidal.

En un sistema aislado, el inversor es necesario cuando pretendemos conectar como consumo cargas que necesitan de corriente alterna. En ese caso es necesario el inversor para convertir la corriente continua en alterna y poder satisfacer así las necesidades del usuario.

Sus parámetros más destacados son:

- Tensión de Operación, es la tensión eléctrica de entrada en los bornes de entrada del inversor que puede ser convertida.
- Tensión de salida, es la tensión eléctrica en los bornes de salida del inversor.
- Tensión Nominal de Salida, valor de la tensión de salida utilizado para identificar el inversor.
- Potencia de Entrada, valor de la potencia a la entrada del inversor.
- Potencia de Salida, valor de la potencia de la corriente eléctrica a la salida del inversor.
- Potencia Nominal, potencia de salida que sirve para identificar al inversor.

- Sobrecarga, valor de la potencia de salida superior a la nominal que el inversor puede admitir durante un intervalo de tiempo, manteniendo sus características de funcionamiento.
- Frecuencia Nominal, valor de la frecuencia de salida utilizado para identificar el inversor de DC/AC.



Figura 24: Ejemplo de inversor

1.5.4.5 Cableado

Es el componente indispensable para el transporte de energía eléctrica entre los diferentes bloques del sistema fotovoltaico.

La transmisión de corriente entre los elementos de generación, almacenamiento y regulación, hasta la salida hacia el consumo, debe realizarse de forma efectiva y segura, empleando el cableado adecuado para la potencia de trabajo y las condiciones ambientales previstas.

Es inevitable que ocurra la pérdida de energía en forma de calor, debido a que la resistencia eléctrica del conductor nunca es nula. La elección de un cable conductor representa un compromiso entre un valor bajo de resistencia y el coste del mismo.

Dentro de la gama de materiales existentes, el cobre presenta una buena solución, al ser un material ligero, lo que favorece su empleo en líneas de transmisión de energía eléctrica.

1.5.4.6 Cargas (Lámparas)

Nos referimos con cargas a las lámparas que se usan en las aplicaciones rurales y que son los elementos que consumirán la energía generada por el sistema fotovoltaico aislado. Es un elemento básico de gran uso en aquellas

zonas rurales donde el autoabastecimiento es la única solución viable para poseer energía.

Puede haber otro tipo de cargas, pero normalmente y en nuestro objeto de estudio la carga principal a conectar en el sistema son las lámparas.

El objetivo de estas lámparas es tener una alta eficiencia, es decir, entregar la máxima luminancia respecto a un consumo de Watios dado.

A veces se usan reflectores y concentradores de luz para sacar más partido a la luminancia.

En la siguiente figura se comparan diversas lámparas donde se mide los Watios consumidos y la luminancia por Watio consumido:

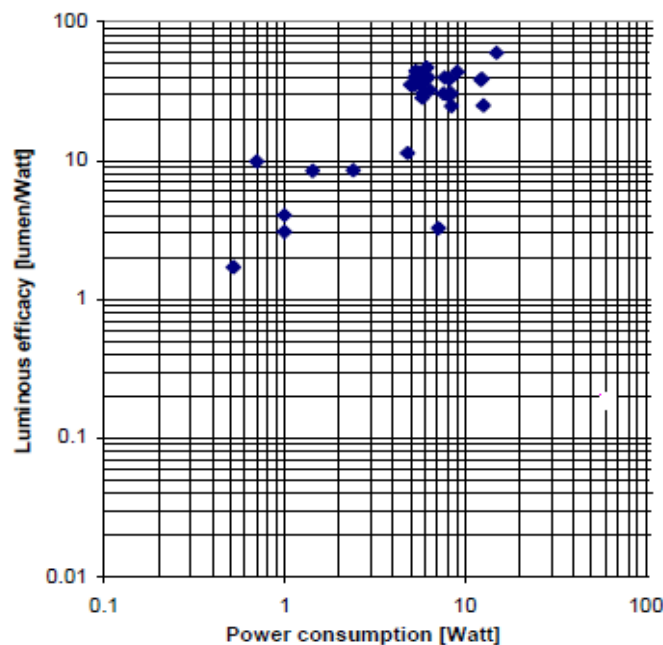


Figura 25: Luminancia de varias lámparas

En ausencia de un procedimiento de homologación de lámparas fluorescentes de continua, estos dispositivos al menos deberían verificar lo siguiente:

La lámpara debe asegurar un encendido seguro en el margen de tensiones de operación, y en todo el margen de temperaturas ambientes previstas. La lámpara debe estar protegida cuando:

- Se invierte la polaridad de la tensión de entrada.
- La salida es cortocircuitada.
- La potencia de entrada de la lámpara debe estar en el margen de 10% de la potencia nominal.

- El rendimiento luminoso de la lámpara debe ser superior a 40 lúmenes/W.
- La lámpara debe tener una resistencia mínima de 5000 ciclos cuando se aplica el siguiente ciclado: 60 segundos encendido / 150 segundos apagado.
- Las lámparas no deben producir interferencias electromagnéticas.

1.5.4.7 Protecciones y seguridad

Las protecciones en la puesta en marcha de una instalación de conexión aislada son muy importantes a la hora de proyectar un sistema aislado:

Todas las instalaciones con tensiones nominales superiores a 48V dispondrán una toma de tierra a la que se conectará la estructura soporte del grupo generador FV y los marcos metálicos de los módulos.

Las masas de todas las cargas de alterna, estarán conectadas a tierra.

El sistema contará con protecciones que brindaran seguridad a las personas frente a contactos directos e indirectos.

La puesta a tierra de las masas y el uso de interruptores diferenciales está particularmente recomendado.

La instalación deberá estar protegida frente a cortocircuitos y sobrecargas y sobre tensiones.

También es recomendable realizar inspecciones visuales de los paneles solares con cámaras de infrarrojos en busca de posibles roturas de células.

Se prestará especial atención a la protección de la batería frente a cortocircuitos, mediante un fusible magnetotérmico o con cualquier otro dispositivo que cumpla una función similar.

El presente documento, como ya se ha mencionado, tiene por objeto estudiar y optimizar la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos en zonas rurales y remotas. Estas zonas se caracterizan por su difícil acceso o lejanía y por escasez de personal cualificado para el mantenimiento de la instalación. Por ejemplo en ciertas zonas rurales la simple rotura de algún componente puede ser un grave problema ya que es posible que no se pueda acceder a un componente nuevo porque no está disponible o bien porque está fuera de precio. Por ello, un sistema fotovoltaico autónomo es una buena solución para llevar energía eléctrica a zonas remotas. Por tanto y para que llevar energía eléctrica a estas zonas no sea una propuesta económica

arriesgada, tener una alta fiabilidad es vital para la puesta en marcha de una instalación fotovoltaica autónoma.

En el siguiente capítulo se analizará este importante concepto que es la fiabilidad.

2. TEORÍA DE FIABILIDAD

2.1 Evolución histórica de la fiabilidad

Puede resultar interesante hacer mención a los principales avances en la fiabilidad desde sus orígenes. Así, su comienzo histórico se inicia en el año 1713 cuando el eminente matemático suizo Jakob Bernouilli formuló la ley del producto de la probabilidad de dos sucesos independientes, primera referencia ligada al análisis de la fiabilidad como hoy la entendemos, en la que se basarían muchos de los postulados planteados 200 años después.

Los primeros datos de tiempo de vida de equipos industriales fueron realizados por Alvord en 1903. Más tarde la New York Telephone Company presentó datos detallados de la experiencia de vida de cables telefónicos aéreos, subterráneos y submarinos. Kurtz construyó el primer modelo probabilístico para determinar tablas de vida.

La primera fase de desarrollo se puede situar entre 1920 y 1960, en la que dos docenas de investigadores aislados realizan los primeros estudios sobre la dispersión de resultados de resistencias y cargas.

En la década de 1930, el grupo ARINC (Aeronautical Radio Incorporated), que se había formado en 1929, intensifica sus trabajos con estudios de fiabilidad aplicados a la aviación.

Entre las dos guerras mundiales, se realizaron cálculos de probabilidades sobre la seguridad de funcionamiento, actuando sobre aviones capaces de volar con uno o más motores parados, y obteniendo estadísticas sobre tasas de fallo de los equipos instalados, con objeto de planificar las necesidades de repuestos.

La fiabilidad como técnica que cuantifica las probabilidades de funcionamiento, comenzó realmente durante la Segunda Guerra Mundial. El matemático Erich Pieruschka, quién asumió que los componentes técnicos seguían las mismas leyes que las sustancias los seres vivos, planteaba a los diseñadores de las bombas alemanas, la necesidad de calcular la fiabilidad de los componentes de dichos ingenios, al objeto de mejorar la fiabilidad del sistema. Pieruschka expuso que **la probabilidad de éxito en un sistema es el producto de las probabilidades de éxito de cada uno de sus componentes.**

En los años cincuenta recibieron un notable impulso los estudios sobre fiabilidad en EE.UU., actuando sobre la electrónica e industrias aeroespacial y militar. A los proveedores de dichos equipos y componentes, se les empezó a exigir especificaciones de fiabilidad.

Entre los primeros estudios sobre la fiabilidad destaca el realizado por Boodman (1953) para radares de aviones. Encontró que el tiempo de fallo venía dado por la distribución exponencial.

La casi permanente situación de estado de guerra a que se ha visto sometida la industria norteamericana le ha obligado a una constante preocupación por los temas de fiabilidad. Ello, le ha supuesto notables éxitos en todos los campos, aeroespacial, nuclear y electrónico.

En las décadas de los setenta y ochenta se desarrollan gran número de estándares basados en planteamientos de probabilidad.

A partir de la década de los ochenta y hasta nuestros días, se ha venido trabajando en la mejora de las técnicas para el cálculo de fiabilidad.

Cada día se consigue analizar con mayores garantías de éxito la fiabilidad de los sistemas, mediante el desglose y análisis de la fiabilidad de sus componentes elementales.

Dentro del sector energético, son las centrales nucleares donde primero se han desarrollado los estudios de fiabilidad energética para, posteriormente, extrapolarse al resto de tecnologías energéticas.

2.2 Definición fiabilidad

La fiabilidad comprende un conjunto de métodos matemáticos y estadísticos, procedimientos organizativos y prácticas operativas que, mediante el estudio de las leyes de ocurrencia de los fallos, están dirigidos a la resolución de los problemas de previsión, estimación y optimización de la probabilidad de supervivencia, duración media de la vida y porcentaje de tiempo en buen funcionamiento de un sistema. Así, podemos definir la fiabilidad como probabilidad de que un bien funcione correctamente durante un período determinado de tiempo.

Se define la fiabilidad por tanto, como la probabilidad de que un sistema sea capaz de cumplir con su cometido durante un intervalo de tiempo en unas determinadas condiciones.

La fiabilidad representa realmente una extensión de la calidad operacional durante un período de tiempo, lo que supone una dimensión de la calidad.

La fiabilidad de un sistema, depende de las fiabilidades de sus componentes y de la forma de conexión entre ellos, y puede obtenerse mediante ensayos o mediante cálculo de probabilidad a partir de las fiabilidades de componentes individuales. De igual forma puede obtenerse la fiabilidad del sistema.

La obtención de la fiabilidad de los componentes individuales, solamente puede obtenerse por experimentación, aunque en algunos casos pueda ésta ser estimada en la fase de diseño, lo cual no deja de ser una aproximación.

La ingeniería de fiabilidad es el estudio de la longevidad y el fallo de los equipos. Para la investigación de las causas por las que los dispositivos envejecen y fallan se aplican principios científicos y matemáticos. El objetivo estriba en que una mayor comprensión de los fallos de los dispositivos ayudará en la identificación de las mejoras que pueden introducirse en los diseños de los productos para aumentar su vida o por lo menos para limitar las consecuencias adversas de los fallos.

Es deseable que los sistemas diseñados sean fiables, en el sentido de que el usuario pueda operarlos sin que exista un elevado riesgo de fallo. El nivel de fiabilidad, o seguridad de operación satisfactoria, dependerá de la naturaleza del objetivo del sistema. El que un sistema tenga cierta fiabilidad llevara un coste y un esfuerzo asociado, por lo que la exigencia de fiabilidad para un sistema debe adecuarse a su objetivo.

2.3 Parámetros principales y definición de fallo

Se ha mencionado innumerables veces el término fallo. A continuación se va a matizar qué significa el concepto de fallo en el terreno que nos conviene, dada la amplitud de este término:

Entendemos por **fallo** como el estado para determinar que un elemento o componente deja de estar operativo y por tanto no puede desempeñar correctamente su función, o dicho de otro modo, es el estado no operativo en el cual el elemento no puedes desarrollar su cometido para el que fue designado.

Este fallo puede ocurrir de dos formas:

Fallo catastrófico, es el que ocurre de forma repentina como puede ser un cortocircuito o un circuito abierto.

Fallo gradual o debido a la degradación de las prestaciones

También se van a definir los siguientes parámetros relacionados con el concepto de fallo y la fiabilidad cuyo objetivo es analizar analíticamente:

- La **función densidad probabilidad de fallos $f(t)$** es la probabilidad de que un elemento cualquiera tenga un fallo en un intervalo de tiempo.

- La **función de distribución F(t)** describe la probabilidad de que un elemento falle hasta un instante de tiempo t.

$$F(t) = \int_0^{\infty} f(t)dt$$

Por ejemplo si $F(0) = 0$ y $F(\infty) = 1$ significa que todo empieza bien y todo acaba fallando en algún momento.

- La función de **fiabilidad R(t) o curva de supervivencia** es una función de distribución complementaria a F(t) y es la probabilidad de que un elemento funcione hasta el instante t:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

- Otra función muy importante en el análisis de la fiabilidad es la **tasa de fallos $\lambda(t)$** , la cual se define como la densidad de probabilidad de fallo en un tiempo t condicionado a no haber fallado antes de t:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = h(t) = \frac{dF(t)/dt}{R(t)}$$

En los dispositivos electrónicos, la tasa de fallos $\lambda(t)$ sigue una curva conocida como “**la curva de la bañera**” y se corresponde con la tasa de fallos que siguen las personas durante la vida:

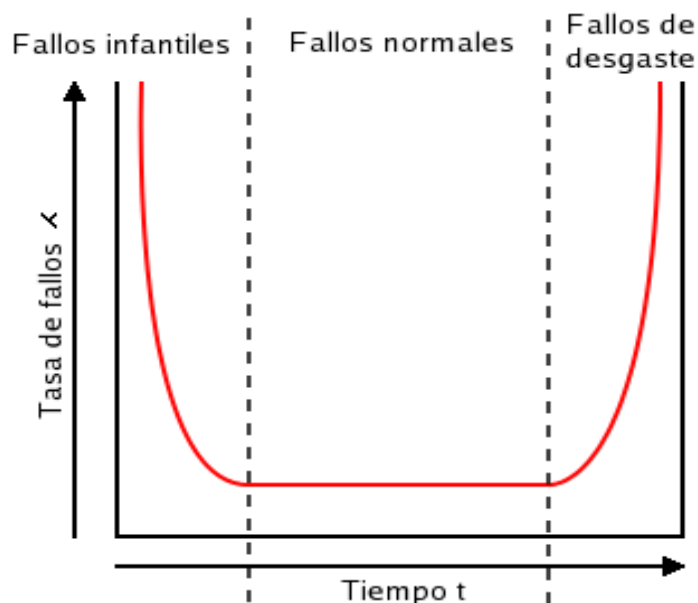


Figura 26: Curva de la bañera

En el primer periodo, se tiene una tasa de fallos decreciente que se corresponde con un periodo de vida infantil, en el que los fallos son debidos a problemas de calidad de fabricación, elementos defectuosos.

En la segunda etapa, los fallos son aleatorios y se mantiene una velocidad de fallos constante, no influye el paso del tiempo de manera notable.

En el último periodo de la gráfica, la tasa de fallos aumenta con el tiempo y corresponde con la fase de envejecimiento de las personas, es decir comienzan a aparecer fallos con mayor frecuencia pues su degradación se va acelerando.

En muchas aplicaciones puede ser más relevante la información correspondiente a la tasa de fallos $\lambda(t)$ que la función de fiabilidad $R(t)$ ya que la primera nos enseña la evolución de la probabilidad de fallo de los elementos que aun permanecen operativos en cada instante de tiempo.

- **Mean Time To Failure (Tiempo medio hasta el primer fallo); MTTF**, el cual indica el valor esperado hasta el primer fallo:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt$$

- **Mean Time Between Failures; MTBF**, describe el tiempo medio esperado entre dos fallos consecutivos en un elemento o sistema. En los sistemas reparables es un concepto muy importante para medir la fiabilidad.

MTBF: cuando se trata de unidades reparables

MTTF: cuando se trata de unidades no reparables

- **Mean Down Time; MDT**, es el tiempo medio de caída del sistema.
- **Mean Up Time; MUT**, tiene el mismo valor que el MTTF en los sistemas reparables.

En la siguiente imagen vemos desglosados y en orden de aparición los tiempos explicados:

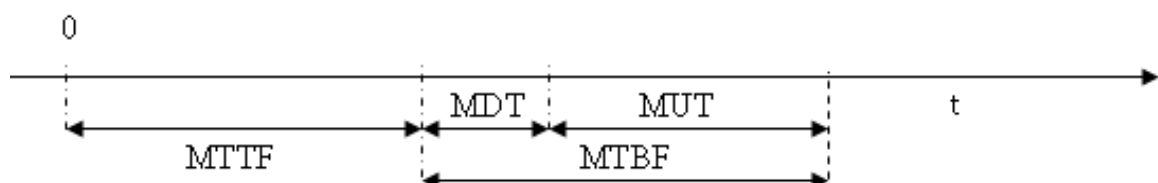


Figura 27: Desglose de los tiempos más importantes en materia de fiabilidad

Para aplicar todas estas expresiones necesitamos de distribuciones estadísticas que describan las leyes de fallo de los elementos, en nuestro caso, de los elementos que componen un sistema fotovoltaico autónomo.

La función que representa el comportamiento de un elemento y sus fallos se denomina distribución de fallo. Con ella se intenta describir matemáticamente la longitud de la vida de un material una estructura o una máquina. Los distintos modos de fallo de un equipo, rotura, corrosión química, fatiga debida a un ciclo de trabajo, afectarán a la forma analítica de la función. Este problema ha originado el desarrollo de una teoría propia, la teoría de distribuciones de fallo y fiabilidad de equipos.

2.4 Funciones de distribución

Se van a estudiar la distribución **normal**, **exponencial** y **de Weibull**.

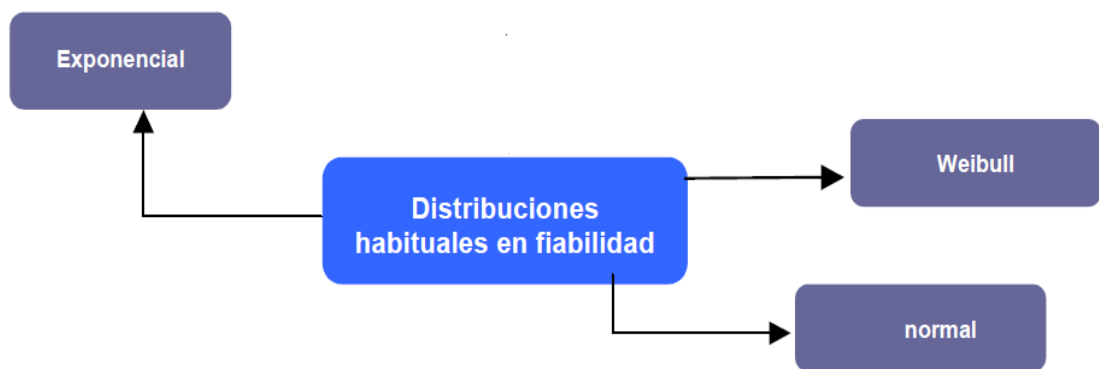


Figura 28: Funciones de distribución más importantes

2.4.1 Distribución normal

La función de distribución normal, se utiliza en el análisis de fiabilidad de los elementos que están en el periodo de vida de envejecimiento. Resulta un modelo razonable cuando el elemento o dispositivo presenta un único modelo de fallo.

La función distribución normal se define con dos parámetros: la desviación típica σ y la media μ .

La curva normal tiene forma de campana y un solo pico en el centro de la distribución.

La distribución normal es simétrica respecto de su media μ (centro de la campana).

Se observó que no existe una sola distribución de probabilidad normal, sino una familia de ellas. Como sabemos, cada una de las distribuciones puede tener una media (μ) o una desviación estándar distinta (σ). Por tanto, el número de distribuciones normales es ilimitado y sería imposible proporcionar una tabla de probabilidades para cada combinación de μ y σ . Para resolver este problema, se utiliza un solo miembro de la familia de distribuciones normales, aquella cuya media es 0 y desviación estándar 1 que es la que se conoce como **distribución estándar normal**, de forma que todas las distribuciones normales pueden convertirse a la estándar, restando la media de cada observación y dividiendo por la desviación estándar.

La probabilidad de que una variable aleatoria como el tiempo tome un valor determinado entre dos sucesos coincide con el área encerrada por la función.

A continuación se dibujan la función densidad de probabilidad, la fiabilidad y la tasa de fallos:

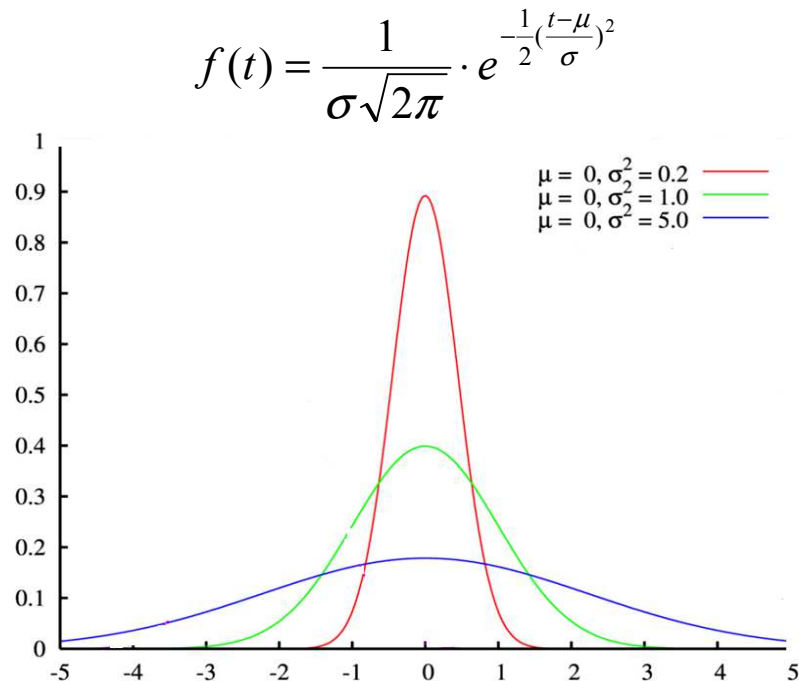


Figura 29: Función densidad de probabilidad de la función de distribución normal

$$R(t) = 1 - \Phi\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)$$

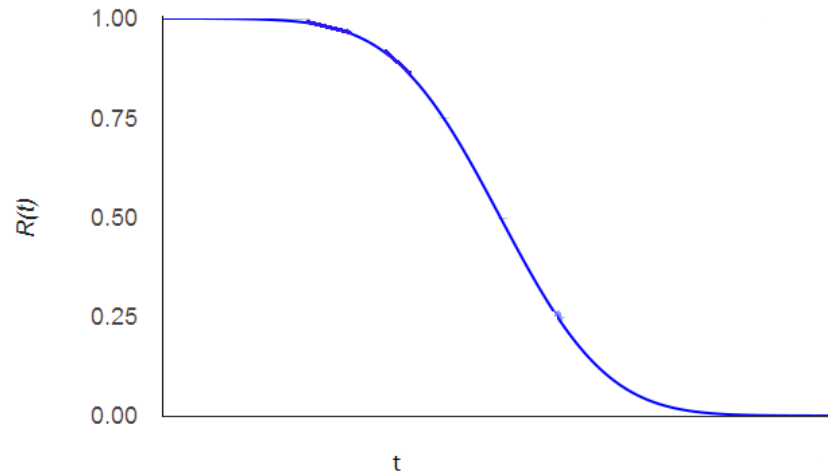


Figura 30: Función de fiabilidad de la función de distribución normal

$$\lambda(t) = h(t) = \frac{f(t)}{1 - \phi\left(\frac{t - \mu}{\sigma}\right)}$$

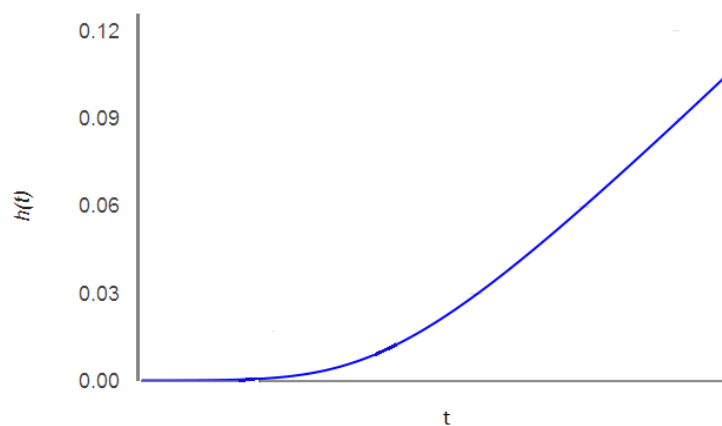


Figura 31: Tasa de fallos de la función de distribución normal

2.4.2 Distribución exponencial

La función de distribución exponencial se utiliza para modelar el tiempo transcurrido entre dos sucesos aleatorios cuando la tasa de ocurrencia, λ , se supone constante. Únicamente se define con este parámetro, λ .

En fiabilidad se usa para describir los tiempos de fallo de un dispositivo durante su etapa de vida útil, en la cual la tasa de fallo es constante, $h(t) = \lambda$. Una tasa de fallo constante significa que, para un dispositivo que no haya fallado con anterioridad, la probabilidad de fallar en el siguiente intervalo es independiente del tiempo.

A continuación se dibujan la función densidad de probabilidad, la fiabilidad y la tasa de fallos:

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}$$

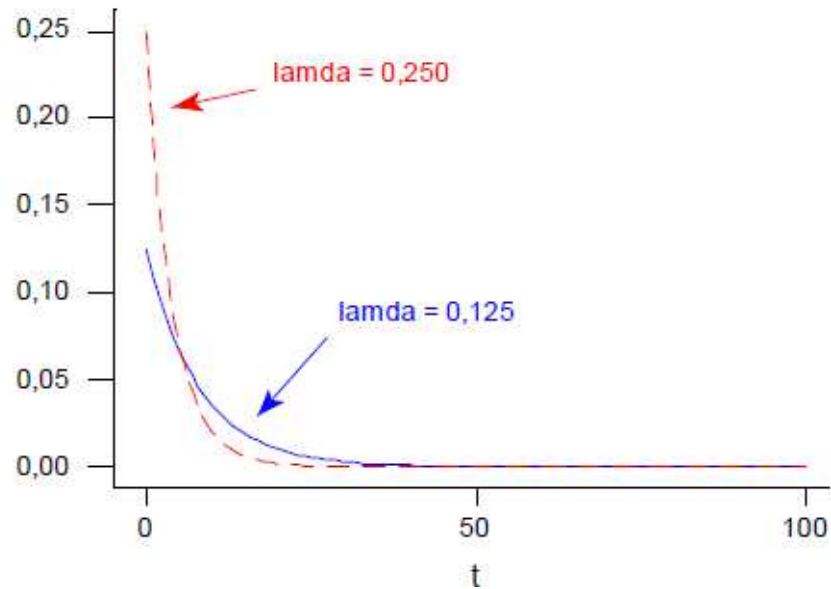


Figura 32: Función densidad de probabilidad de la función de distribución exponencial

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

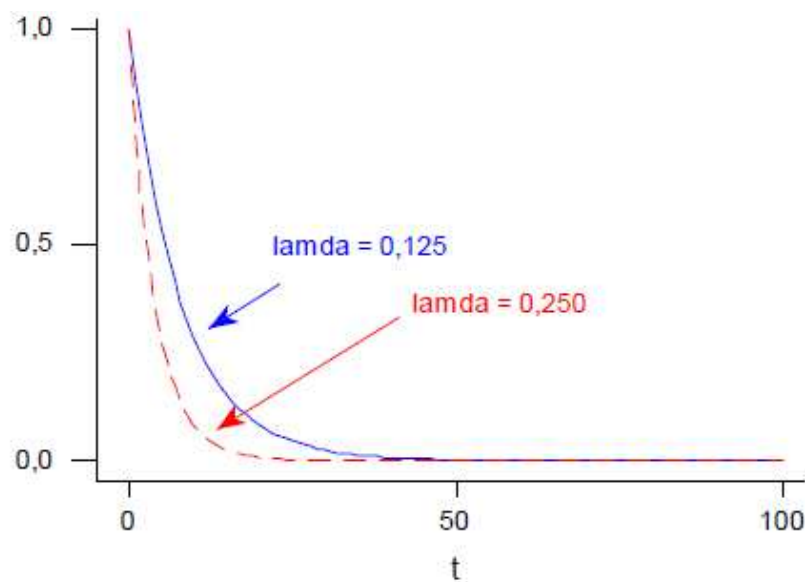


Figura 33: Función de fiabilidad de la función de distribución exponencial

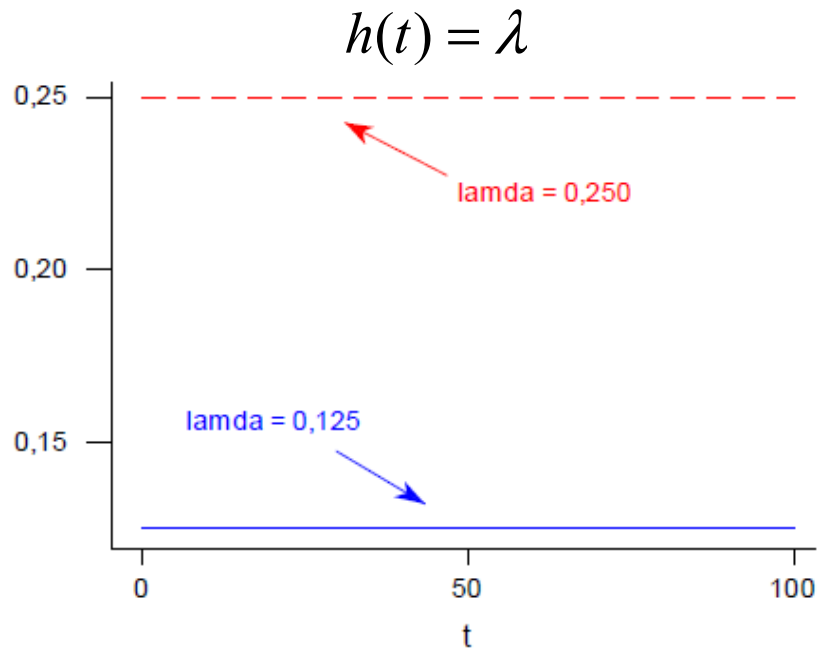


Figura 34: Tasa de fallo de la función de distribución exponencial

Cuando la tasa de fallos no depende del tiempo y por lo tanto es constante ocurre que:

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t}$$

2.4.3 Distribución de Weibull

El ingeniero sueco W. Weibull estudió la vida de fatiga de los metales (1939) y propuso la ley de distribución que lleva su nombre. En 1951 se publica en el Journal of Applied Mechanics, el artículo titulado “A Statistical Distribution Function of Wide Applicability”, pasando casi desapercibido, a excepción de los investigadores especialistas en fatiga de los metales.

En la década de los años cincuenta, J. H. Kao, de la Cornell University estudió el comportamiento de elementos electrónicos ajustándoles con éxito a la distribución de Weibull.

En 1962, A. Plait, como resultado de sus trabajos de investigación, propuso la utilización de gráficos con escalas funcionales, llegando en la actualidad al uso del papel probabilístico de Weibull, de gran utilidad en los estudios de fiabilidad.

La distribución de Weibull es, probablemente, la distribución más utilizada en teoría de fiabilidad. Ello se debe a la **gran flexibilidad que presenta esta distribución, mediante la cual es posible modelar cada una de las tres**

etapas típicas de la curva de la bañera ya mencionada anteriormente: la etapa inicial; con tasa de fallo decreciente, la etapa de vida útil; con tasa de fallo aproximadamente constante, y la etapa final; caracterizada por una tasa de fallo creciente. Puede decirse, que la distribución de Weibull es un caso general de todas las distribuciones continuas por lo que resultan de gran aplicación en todos los estudios.

Esta gran flexibilidad nos permite usar un mismo modelo independientemente de en que forma varíe la tasa de fallos del componente en cuestión., simplificando en gran medida la tarea de análisis de resultados.

La función distribución de Weibull se define con tres parámetros: γ ; parámetro de origen que muestra a partir de que tiempo origen empiezan a fallar los elementos (se suele simplificar con un valor de 0), β ; parámetro de forma que muestra en que periodo de vida de la curva de bañera se encuentra el elemento, η ; parámetro de escala que define cuán dispersa se encuentra la distribución.

A continuación se dibujan, y por este orden, la función densidad de probabilidad, la fiabilidad y la tasa de fallos:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left[\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta} \right]}$$

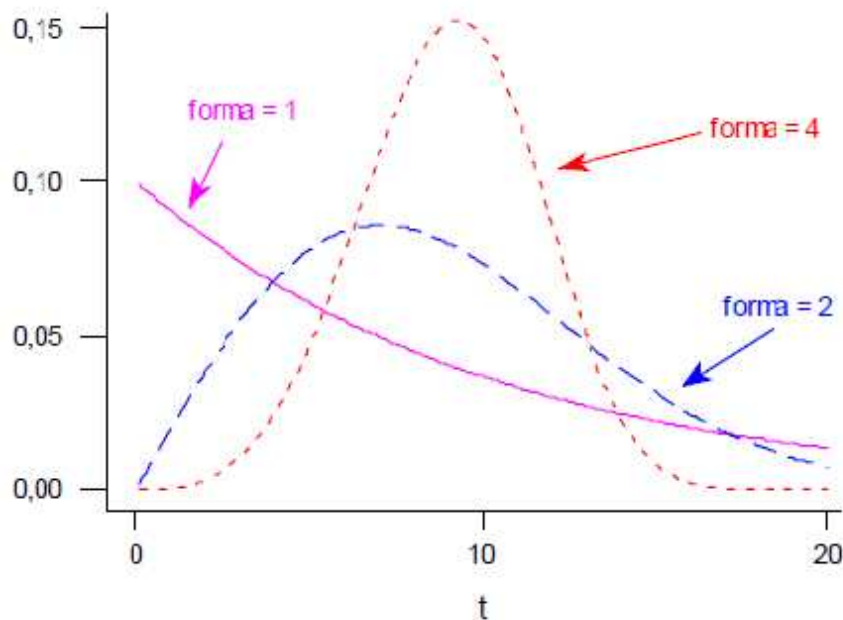


Figura 35: Función densidad de probabilidad de la función de distribución de Weibull

$$R(t) = e^{-\left[\frac{(t-\gamma)^\beta}{\eta}\right]}$$

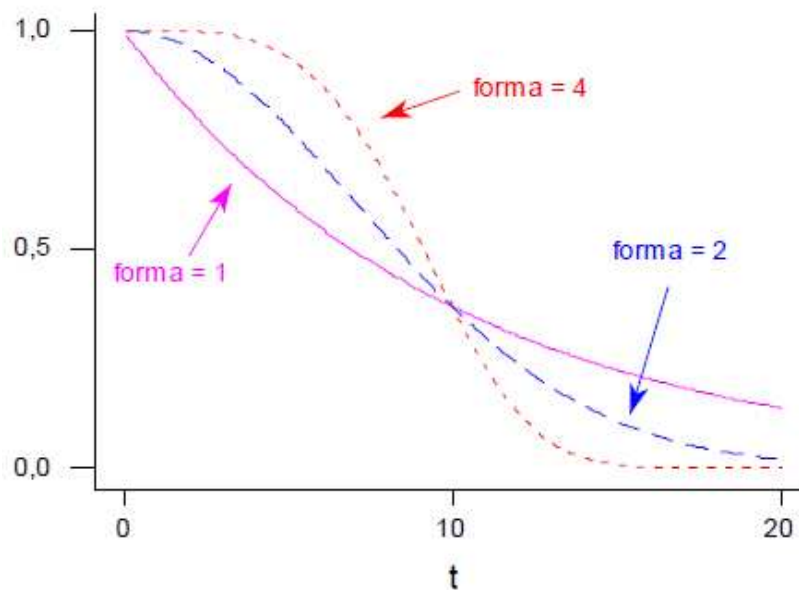


Figura 36: Función de fiabilidad de la función de distribución de Weibull

$$\lambda(t) = h(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

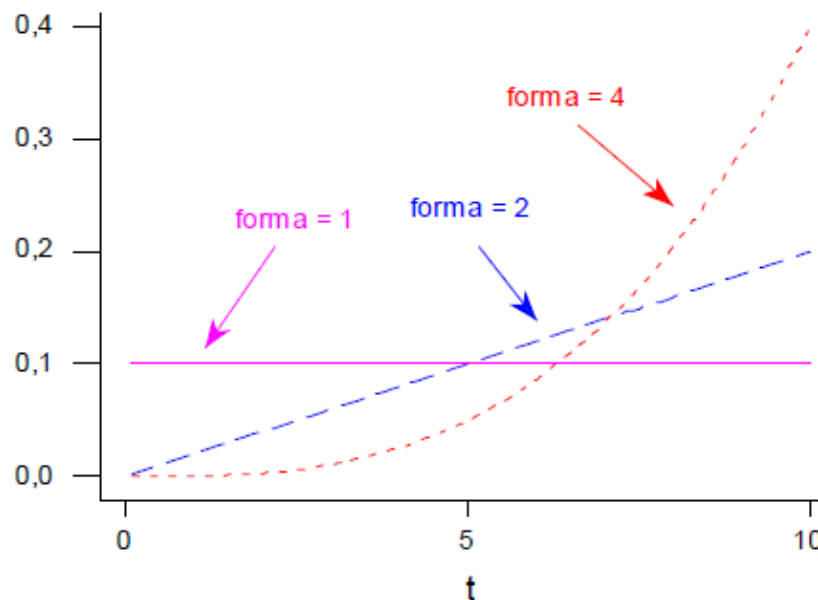


Figura 37: Tasa de fallo de la función de distribución de Weibull

Si $\beta < 1$ la tasa de fallo es decreciente con el tiempo, la tasa de fallos mejora con el tiempo transcurrido, lo que se corresponde en la curva de la bañera con la primera etapa o etapa de mortalidad infantil.

Si $\beta = 1$ la tasa de fallos es constante, no depende del tiempo. Esto se corresponde con la vida útil de la curva de la bañera, se producen fallos de forma aleatorios a lo largo del tiempo.

Si $\beta > 1$ la tasa de fallos es creciente. Esto se corresponde con la zona de envejecimiento que es la última etapa de la curva de la bañera o etapa de envejecimiento.

Por tanto y como se ha visto, la función de Weibull se puede ajustar a funciones de fiabilidad que se encuentran en las tres etapas de la curva de la bañera.

A continuación se definen los distintos tipos de modelado o conexionado en un sistema que lo componen varios elementos. Dependiendo de su tipología, el estudio o estimación de la fiabilidad del sistema completo se evalúa de una forma u otra.

2.5 Teoría de sistemas

A continuación, se trata de explicar las diferentes topologías de conexión de elementos dentro de un sistema. Dependiendo de su conexionado la fiabilidad puede resultar totalmente diferente.

2.5.1 Conexión en serie

En una configuración en serie el fallo de cualquiera de sus componentes provoca el fallo del sistema. En la mayoría de los casos, cuando consideramos sistemas completos y su descomposición más básica, se obtiene una ordenación lógica de sus componentes en serie:

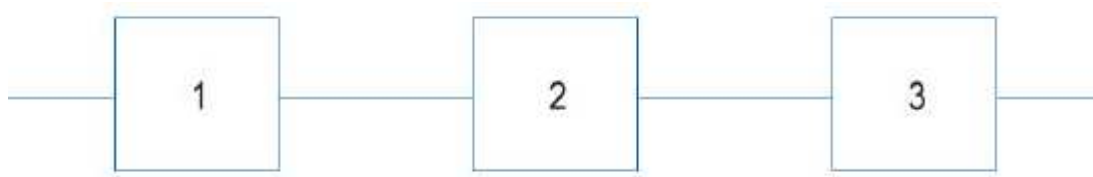


Figura 38: Diagrama de bloques de un sistema serie

La fiabilidad del sistema es la probabilidad de que todas las componentes del sistema funcionen. Como consideramos independientes los tiempos de vida de las componentes entonces la fiabilidad del sistema es:

$$R_s = P(X_s = 1) = P(X_1 = 1, \dots, X_n = 1) = \\ P(X_1 = 1) \cdot \dots \cdot P(X_n = 1) = R_1 \cdot \dots \cdot R_n$$

Por tanto, para que en este caso el sistema funcione, deben funcionar todos y cada uno de sus elementos.

2.5.2 Conexión en paralelo

En una configuración en paralelo se precisa el funcionamiento de al menos una componente para que el sistema funcione. Se dice que las componentes son redundantes. La redundancia es uno de los métodos utilizados para mejorar la fiabilidad de un sistema. La función estructura del sistema es:

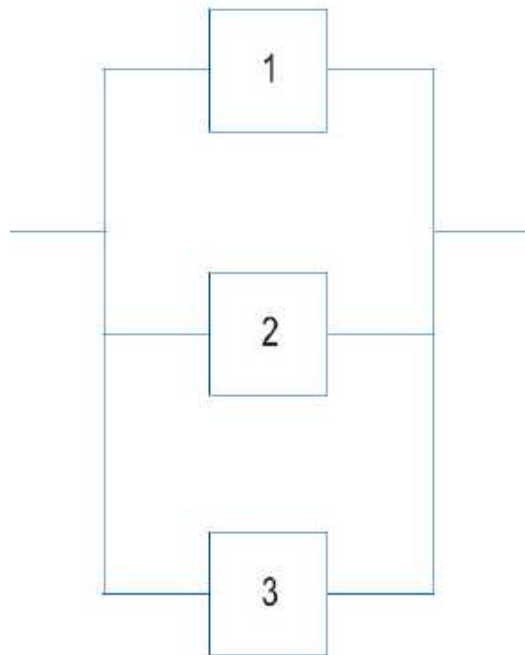


Figura 39: Diagrama de bloques de un sistema paralelo

La función de fiabilidad de sistema es:

$$R_s = 1 - P(X_1 = 0, \dots, X_n = 0) = 1 - P(X_1 = 0) \cdot \dots \cdot P(X_n = 0) = 1 - (1 - R_1) \cdot \dots \cdot (1 - R_n)$$

En este caso, para que el sistema falle, deben fallar todos y cada uno de sus elementos.

También existe la combinación de ambos sistemas. La fiabilidad resultante en ese caso se calcularía evaluando primero la fiabilidad de cada subsistema para posteriormente combinarlos de manera adecuada.

2.6 Resumen teórico

En este capítulo se ha realizado una introducción a la teoría de fiabilidad para una comprensión mayor del análisis de los resultados de las bases de datos que en el documento se exponen. Resumiendo, se ha explicado:

- El concepto de fiabilidad
- El concepto de fallo
- Las principales funciones de fiabilidad como la función densidad de probabilidad de fallos $f(t)$, la función probabilidad de fallos $F(t)$, la función de fiabilidad $R(t)$ y la función de tasa de fallos $\lambda(t)$
- Los parámetros MTTF, MTBF, y la distinción entre sistemas reparables y no reparables.
- Las funciones de distribución estadísticas más utilizadas como la normal, la exponencial y Weibull.
- Se ha destacado la importancia, versatilidad y la utilidad de la función estadística de Weibull.
- Se ha explicado el sistema serie y paralelo y lo que cada uno implica en términos de fiabilidad

3. FIABILIDAD DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO.

3.1 Definición de sistema autónomo

En los sistemas fotovoltaicos autónomos, la fiabilidad es el concepto más importante en los análisis y dimensionado de la instalación y sus componentes.

En sistemas de generación eléctrica como es el caso que nos ocupa, el término fiabilidad se aplica a la función de suministro de energía bajo demanda.

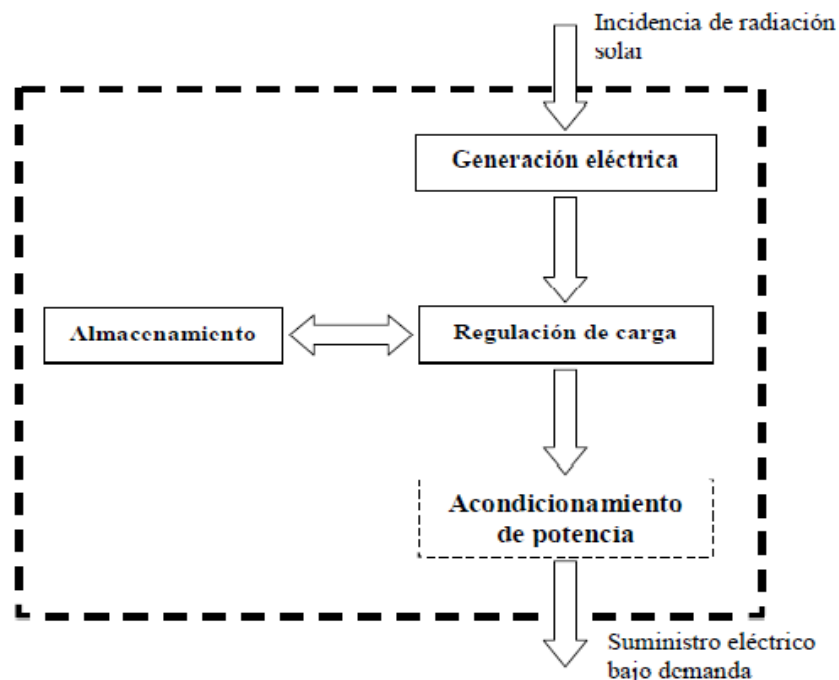


Figura 40: Esquema suministro bajo demanda

Primeramente ya se pueden destacar 3 factores que engloban todas las posibles causas que perjudican el suministro y por ende a la fiabilidad:

- **Fuente de energía escasa**
- **Demanda de energía excesiva**
- **Fallo o rotura**

Cualquier tipo de causa que provoque la falta de suministro eléctrico se engloba en esas tres posibles causas.

En teoría de fiabilidad se conceptúa un sistema como el ente formado por componentes susceptibles de fallo, en el que determinados fallos de componentes conducirán a un fallo del sistema total.

El análisis de fiabilidad de un sistema es está basado en dos análisis técnicos que son el cualitativo y el cuantitativo.

El análisis cuantitativo, nuestro análisis, está basado en la identificación del modelado físico y de las conexiones lógicas, y a partir de ahí evaluar matemáticamente la fiabilidad. En este punto tenemos que destacar la siguiente metodología en fiabilidad de un sistema el cual se modela a través de un **conjunto de bloques que representan los componentes y su organización**; desde el punto de vista de fiabilidad.

Cuando hablamos de componentes en paralelo se entiende que estos tienen independencia con el resto del sistema mientras que en el caso de un sistema con componentes en serie el sistema en su totalidad depende de todos y cada uno de los bloques, como ya vimos en teoría de fiabilidad.

La conexión serie es la que nos ocupa en el presente trabajo, donde como hemos explicado, un fallo de cualquiera de los elementos implica el fallo del sistema.

3.1.1 Esquema eléctrico del sistema fotovoltaico

Para hacer el análisis de nuestro esquema es necesario conocer como están conectados y organizados los diferentes elementos:

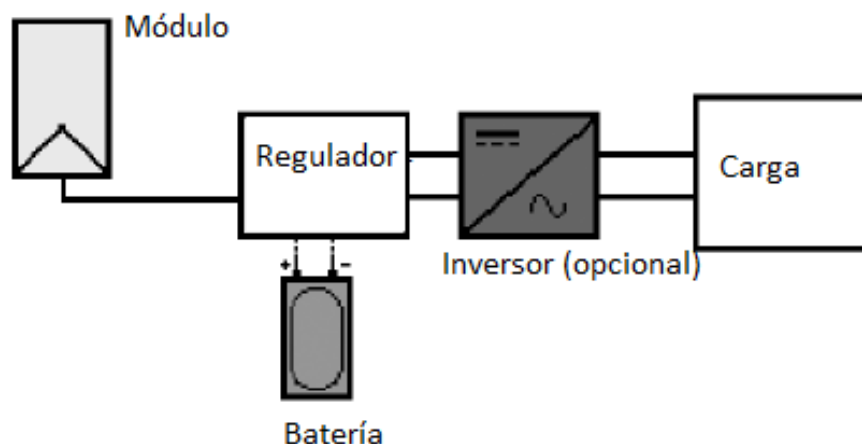


Figura 41: Esquema eléctrico típico de un sistema fotovoltaico autónomo

Como se adelantó, se trata de un sistema en conexión serie. Para que el usuario final pueda satisfacer sus necesidades no debe fallar ningún elemento.

3.1.2 Esquema de fiabilidad del sistema:

A partir del esquema anterior, para un correcto funcionamiento del sistema es necesario que no haya fallo en cada uno de los elementos. En su **diagrama de bloques en serie** observamos la dependencia del sistema con respecto a todos los componentes:

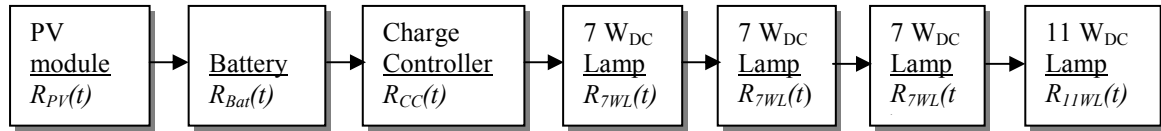


Figura 42: Diagrama de bloques en serie de un sistema fotovoltaico autónomo

La fiabilidad del sistema en serie en todo su conjunto resulta de la multiplicación de las fiabilidades de cada elemento del sistema:

$$R_s = P(X_s = 1) = P(X_1 = 1, \dots, X_n = 1) = \\ P(X_1 = 1) * \dots * P(X_n = 1) = R_1 * \dots * R_n$$

Por tanto, analizando la fiabilidad de cada uno de los bloques podemos calcular la fiabilidad del sistema.

3.2. Fases y pasos ante la probabilidad de fallo en un sistema

La disponibilidad del sistema depende de los fallos de sus elementos, por tanto estos marcan el tiempo de vida del sistema en su totalidad. En este contexto, la falta de recursos económicos, una insuficiente formación técnica, dificultades de transporte y acceso o la indisponibilidad de repuestos pueden influir en el tiempo de operación del sistema.

En este tipo de análisis, se consideran los posibles fallos en operación normal y ante accidentes, pero también la degradación de los componentes y, en general, su operación incorrecta. En realidad, la aparición de fallos evoluciona de forma diferente en función del tipo de componente incluido en cada tecnología de generación eléctrica.

Otra distinción importante es distinguir entre sistemas reparables y no reparables. Se define un sistema reparable como el que, después de un fallo producido, recupera su función o cometido a través de la correspondiente reparación o sustitución de alguno de sus componentes. Es por tanto de gran importancia tener una buena capacidad de mantenimiento y reposición del servicio después de una avería.

Después de un fallo o rotura se suceden una serie de situaciones que pueden agruparse por orden temporal en:

- Percepción del fallo
- Detección del fallo
- Reparación o sustitución del componente en cuestión.

La fase más importante en la instalación de un sistema fotovoltaico autónomo es la fase de diseño y **dimensionado** del proyecto. Básicamente hay que ajustarse a la radiación solar de la localización en cuestión, de las cargas que se vayan a colocar, de la infraestructura y posibilidades de la localización y sobre todo y más importante de las necesidades del usuario. Esto último significa, operar durante unas determinadas horas, abastecer con determinada electricidad, cubrir determinada población, depender de unos determinados costes, etc.

En el dimensionado, aparte de ajustarnos a una localización determinada se debe optimizar correctamente los componentes que forman el sistema completo. Para ello debemos estudiar la fiabilidad de todos los elementos, la influencia y dependencia entre ellos mismos.

Con todo ello, se debe asegurar una correcta selección de equipos y componentes teniendo en cuenta siempre, la disponibilidad y coste de los repuestos necesarios para asegurar la **sostenibilidad** de la instalación fotovoltaica.

En la **electrificación rural**, a la hora de elegir o comprar los elementos del sistema nos encontramos con la opción de seleccionar componentes fabricados en países tecnológicamente más desarrollados y posiblemente de mayor calidad técnica, o bien promover el uso de componentes de fabricación local y muy seguramente de menor coste. Otra alternativa consiste en invertir y favorecer el desarrollo de la energía solar en este tipo de zonas rurales para tener una menor dependencia de proveedores externos, ya que los largos desplazamientos para atender pequeñas instalaciones remotas, el incremento del coste asociado y la falta de recursos de este sector marcan el devenir de los tiempo de mantenimiento de las instalaciones fotovoltaicas y por tanto de su uso cotidiano. La experiencia acumulada ha ido dando cada vez más relevancia al mantenimiento como uno de los factores básicos que determinan la operación de las instalaciones a largo plazo.

Por tanto, el objetivo a largo plazo sería obtener una mayor calidad de productos y un personal cualificado y por tanto una creciente fiabilidad.

En el análisis de la probabilidad de fallo de un sistema son precisos realizar los siguientes pasos:

- Identificar aquellos componentes críticos cuyo servicio es fundamental para el sistema.
- Determinar los modos de fallo del sistema, es decir, establecer las relaciones que determinan el fallo global en virtud del fallo de los componentes unitarios.
- Calcular la probabilidad de fallo de cada uno de los elementos unitarios considerados.
- Calcular la probabilidad de fallo del sistema, mediante la metodología adecuada.

3.3 Modos de operación del sistema:

Mientras el sistema fotovoltaico autónomo está en operación, podemos distinguir distintos modos en los que se puede encontrar:

- **En operación:**

El sistema opera de forma continua bajo demanda de consumo, con unas limitaciones de potencia determinadas. La corriente requerida no se suministra a las cargas a una tensión fija sino que presenta oscilaciones de entre -10% y +20% alrededor de su valor nominal.

Dentro del modo de operación propiamente dicho distinguimos entre las fases:

En carga:

Ocurre cuando la energía generada supera a la de consumo y este exceso se va almacenando en la batería.

En reposo:

Ocurre cuando la generación eléctrica es igual al consumo por tanto la batería permanece apenas sin variación de carga.

En descarga:

Ocurre cuando la generación de energía es inferior al consumo, por tanto para suministrar energía a este consumo la batería entrega su energía eléctrica almacenada.

- **En espera por recarga:**

Después de la desconexión del consumo por bajo estado de carga, la batería necesita recuperar parte de su carga hasta volver a conectar de nuevo con el consumo

- **En parada por avería y mantenimiento:**

Con el objetivo de prever y evitar posibles fallos conviene realizar cada cierto tiempo una parada del suministro para realizar el mantenimiento correspondiente del sistema. Siempre que se pueda se evitará la interrupción del servicio.

Cuando se interrumpe el servicio, es de vital importancia los tiempos de reposición del servicio, el cual depende de la accesibilidad de los repuestos, la formación técnica del personal, y la accesibilidad a la propia instalación.

3.4 Clasificación temporal de los fallos de un sistema

Recordemos que el **fallo** se definía como el estado para determinar que un elemento o componente deja de estar operativo y por tanto no puede desempeñar correctamente su función, o dicho de otro modo, es el estado no operativo en el cual el elemento no puedes desarrollar su cometido para el que fue designado

Aquí es donde aparece la ya explicada **curva de la bañera** (bathtub curve) donde conocido el **tipo de fallo**, se puede clasificar en una etapa u otra de la vida útil del elemento en cuestión. En la mayoría de los dispositivos electrónicos, la función tasa de fallo tiene forma de bañera

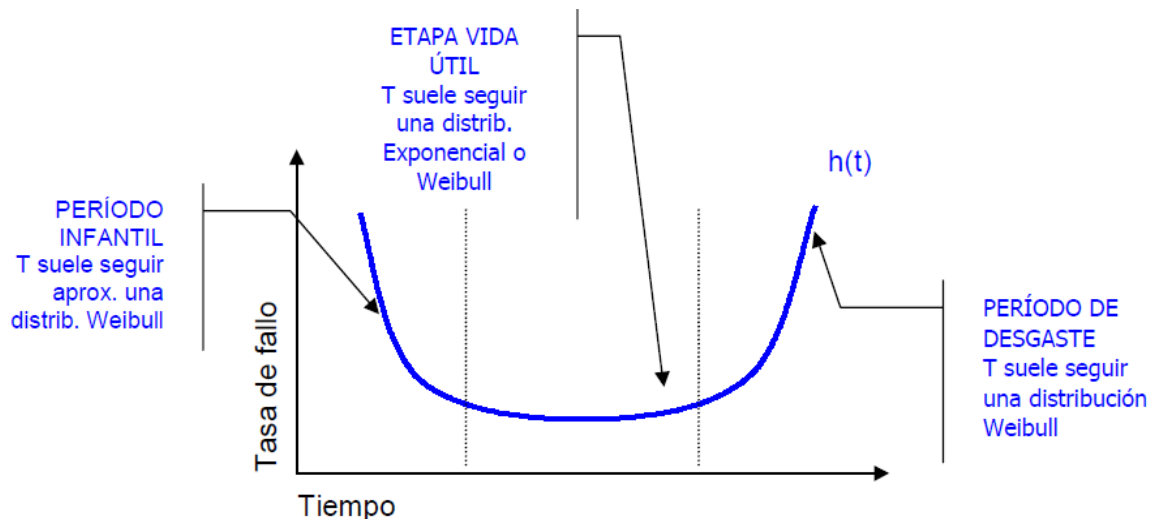


Figura 43: Diferentes etapas en la curva de la bañera

Como vemos se hacen tres distinciones en cuyas regiones suelen aparecer un tipo distinto de fallos. Como se había dicho, la primera región (periodo infantil) corresponde a elementos defectuosos, normalmente fallos de fabricación o montaje y fallos por causas naturales o ambientales. En la segunda y más grande región donde se desarrolla la mayor parte de la vida útil del elemento, los fallos más comunes son por causas ambientales catastróficos o de tipo vandálico y durante este periodo ocurren de forma aleatoria sin que sea posible hacer algún tipo de predicción. En la tercera y última región o periodo de envejecimiento, el elemento está bastante degradado y comienza a aumentar la probabilidad de tener un fallo por degradación máxima, la cantidad de fallos se dispara. Para verlo mejor, veamos un ejemplo de cómo evoluciona el parámetro β , el cual recordemos determina la región de la curva de la bañera donde se encuentra el fallo:

Ejemplo:

Como ejemplo de un análisis de fallos en sistemas fotovoltaicos vamos a ver un caso donde se observa **como evoluciona el parámetro β** con el que podemos saber en que zona de la distribución de Weibull nos encontramos. Se han analizado 300 sistemas fotovoltaicos autónomos durante un periodo de operación de seis años. Durante este periodo todos los fallos se han dividido en dos periodos, el periodo de mortalidad infantil y el periodo de tasa de fallo constante, con unos parámetros respectivamente de $\eta_1 = 0.4$, $\beta_1 = 0.6$ y $\eta_2 = 1$, $\beta_2 = 1$. Para encontrar el valor de T_1 donde se cambia de un periodo a otro y el resto de parámetros se ha hecho una estimación teniendo en cuenta todos los datos recogidos en esos seis años. Aquí vemos como varía el parámetro β_2 :

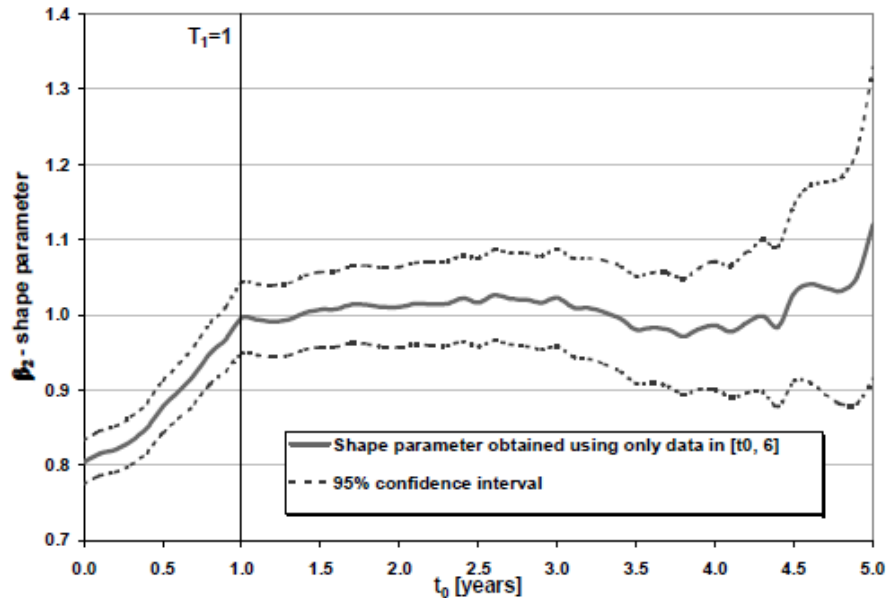


Figura 44: Ejemplo de evolución del parámetro β

Como solo se ha evaluado la fiabilidad en un periodo de seis años, no se ha llegado a la zona de degradación progresiva o envejecimiento. No obstante se puede ver, que a largo plazo la estimación del parámetro β comienza a aumentar considerablemente, es decir, comienza la zona de degradación progresiva o envejecimiento que comentábamos cuando se explicó la curva de la bañera.

Se puede observar que los valores por debajo de T_1 son más pequeños que los valores reales de β . Según pasa el tiempo, la estimación de β aumenta.

3.5 Clasificación de costes en la instalación de un sistema fotovoltaico:

En cuanto a la cuestión económica, de indudable importancia sobre todo en las zonas rurales a las cuales se intenta llevar energía eléctrica dados sus escasos recursos, se puede hacer el siguiente balance distinguiendo por tanto en diferentes costes que optimizan la puesta en marcha del sistema:

$$\text{Costes fijos} + \text{Costes Variables} + \text{O\&M} + \text{Desmantelamiento} < \text{Valor beneficio}$$

Costes fijos: Son los costes fijos de diseño, personal de diseño y control, instalación, equipos, materiales, etc.

Costes variables: Son los costes de reemplazamientos de cualquier elemento y mejoras de cualquier tipo una vez puesta en marcha la instalación.

O&M: Costes de operación y mantenimiento, de personal.

Desmantelamiento: Coste de la eliminación o desmantelamiento del sistema.

Valor de beneficio: Son los beneficios generados del sistema directos e indirectos.

En el diseño y estudio de los costes, la mayor parte del coste inicial de la instalación solar se lo llevan los módulos con aproximadamente el 65% del coste, el 13% se gasta en baterías, y los controladores de carga rondan el 5% de la inversión inicial. Por tanto y dado el peso de los módulos fotovoltaicos, es importante reducir costes en esta parte pues repercutirá notablemente en la accesibilidad y sostenibilidad del sistema en zonas rurales y de escasos recursos.

Dado que los módulos tienen un tiempo de vida por encima de cualquier elemento del sistema, y en el caso de las baterías está muy por debajo de este, los costes a lo largo del tiempo de vida del sistema de cada elemento varía notablemente. Así, el coste que nos supone los módulos a lo largo de su vida en operación supone aproximadamente un 33% frente al 66% que habíamos comentado, es decir, no es un elemento que requiera tanta inversión como se puede pensar en el diseño inicial pues los módulos tienen un más que decente tiempo de vida. En el caso de las baterías, el 13% del coste inicial que se había comentado aumenta hasta un 46%, ya que es un elemento de baja fiabilidad y que a lo largo del tiempo de vida de todo el sistema necesitará más inversión que la que se puede suponer en un diseño inicial sin conocimientos de la fiabilidad de cada componente; de ahí la importancia de este concepto. En cuanto al porcentaje de coste que se invierte en el regulador de carga, se mantiene en torno a un 5%.

En la figura 45 se refleja esto mismo:

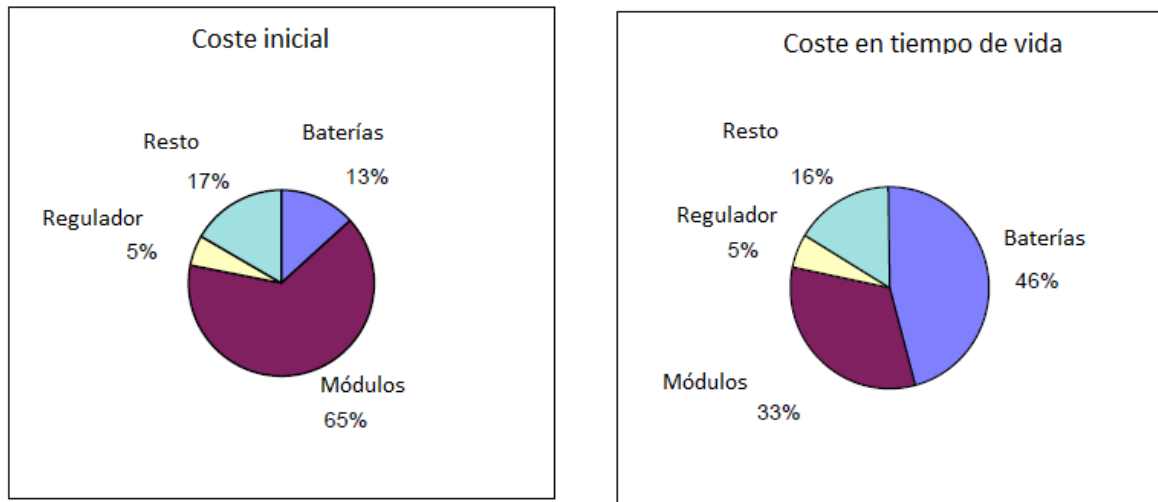


Figura 45: Representación de los costes iniciales y a lo largo del tiempo de vida de los elementos de un sistema fotovoltaico

3.6 Seguridad en un sistema fotovoltaico:

Otro concepto al que tenemos que hacer referencia es el de la **seguridad**. Entendemos por seguridad como la aptitud de un sistema para no poner en peligro a las personas.

Los elementos de seguridad de una instalación fotovoltaicas autónoma son los fusibles, varistores, diodos de paso, etc. No hay elementos más complejos que los mencionados en la electrificación fotovoltaica autónoma rural a día de hoy. Estos elementos de beneficio indudable en cuestiones de seguridad, añade complejidad al sistema y podría causar la parada de suministro en la instalación por fallo propio; como cualquier otro elemento de la instalación. Es decir, son elementos a tener en cuenta para valorar la fiabilidad total del sistema fotovoltaico.

3.7 Fiabilidad del sistema y de sus diferentes elementos

En este apartado se van a abordar el estudio de las diferentes fiabilidades de los elementos que componen un sistema fotovoltaico autónomo.

3.7.1 Fiabilidad del módulo fotovoltaico

El módulo solar es el encargado de generar el flujo eléctrico en el sistema y se considera, como veremos, el elemento más fiable del sistema

3.7.1.1 Explicación general. Array fotovoltaico

Como se ha mencionado, el funcionamiento de este elemento se basa en el efecto fotovoltaico. Cuando el conjunto de los materiales semiconductores que contiene el módulo queda expuesto a la radiación solar, los fotones contenidos en la luz transmiten su energía a los electrones, lo que conlleva que estos se muevan y salgan del semiconductor a través de un circuito exterior, produciéndose así la corriente eléctrica.

La corriente de salida de un panel fotovoltaico está función del voltaje en la carga y la temperatura de trabajo, esto es debido a las características intrínsecas de los materiales semiconductores. La intensidad de corriente que genera un panel aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje aproximadamente constante:

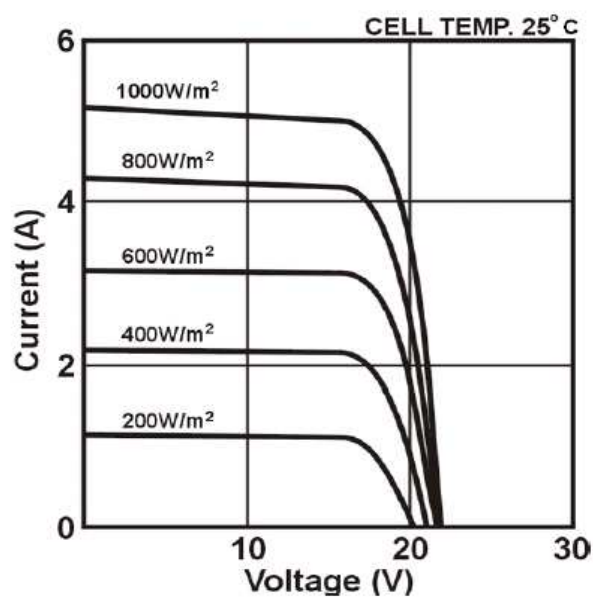


Figura 46: Curva característica de corriente-tensión de un módulo solar.

El módulo fotovoltaico es el elemento más fiable dentro un sistema fotovoltaico autónomo. Son muy pocos los módulos que tienen que ser retirados a lo largo de su tiempo de operación.

Para dimensionar los módulos hay que preguntarse por los Watios requeridos en una localización en cuestión. Esta pregunta la podemos responder mediante los siguientes pasos:

- Determinar la demanda media diaria del usuario.
- Calcular las posibles pérdidas que pueden surgir de inicio y con el tiempo.
- Calcular la potencia a generar.

Todos los módulos fotovoltaicos son estructurados en forma de matriz $m \times n$. La m hace referencia a los módulos conectados en serie y la n a los módulos que están en paralelo, formando entre todos el array de módulos, tal como se observa en la siguiente imagen:

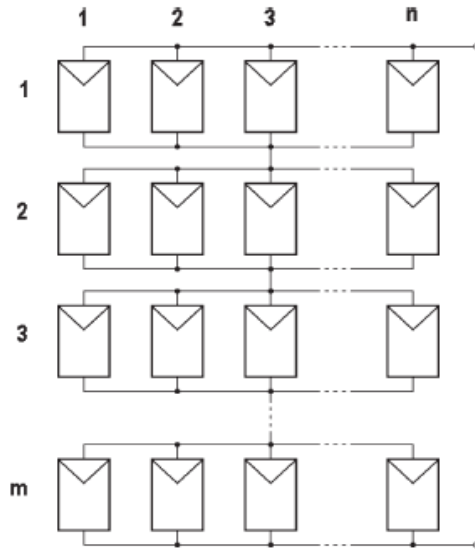


Figura 47: Ejemplo de un array de módulos fotovoltaicos

$$V_{out} = m \cdot V_{out,mod}$$

$$I_{out} = n \cdot I_{out,mod}$$

Se puede dimensionar la potencia de salida según las necesidades oportunas. Se puede incrementar la corriente y el voltaje incrementando el número de módulos manteniendo la topología del array pero añadiendo módulos en la fila m y n .

Si tenemos en cuenta que cada módulo puede generar distinta cantidad energía o dicho de otro modo que puede captar en determinados momentos distinta irradiancia, tenemos que el array se comporta de la siguiente manera:

3.7.1.2 Garantías y valores típicos. Procesos de test

Los módulos fotovoltaicos son elementos de gran fiabilidad, con pruebas de garantías afectadas.

Las garantías de un módulo fotovoltaico pueden agruparse en dos temas: una garantía de los materiales y fabricación la cual suele estar en 1 y 5 años y una garantía de la potencia de salida producida por el módulo. El segundo tipo de garantía que diferenciamos hace referencia a la potencia de salida producida por el módulo después de los primeros 10-12 años la cual debe ser al menos del 90% de la potencia nominal inicial, y a la potencia producida pasados unos

20-25 años en operación donde la potencia debe ser al menos del 80% de la potencia nominal inicial. Es el parámetro más importante de los módulos solares en operación, ya que si el módulo tiene una potencia de salida inferior a su potencia nominal, por fabricación o por degradación, la energía de la batería, y su estado de carga, disminuye en la misma proporción., bajo las mismas condiciones de radiación, temperatura y consumo.

En los últimos años, se ha tratado de garantizar un mínimo de potencia teniendo en cuenta también aparte de lo mencionado, el error de medida que suele ser cerca del 3% y una tolerancia del 5% del módulo (valor típico). Así, para un módulo con determinada potencia tenemos que, pasados 25 años en operación, la potencia mínima del módulo debería ser:

$$P_{lim} = P_o \cdot 0,95 \cdot 0,8 \cdot 0,97$$

En la propia construcción de los módulos junto con la existencia y aplicación de diversas normativas internacionales lo que garantiza la gran fiabilidad en la gran mayoría de estos elementos. Existen estándares de procesos de test antes de que un módulo salga al mercado. Por ejemplo, en el IEC 61215 se describe que se agrupan 8 módulos:

1. Un módulo se toma como referencia y no se somete a ningún tipo de proceso de prueba.
2. Otro módulo es caracterizado eléctricamente (procesos de radiación, pruebas en los diodos, etc.)
3. Los otros seis módulos se dividen en parejas de tres y estos son sometidos a tres diferentes procesos y test mecánicos y ambientales.

Todos los escenarios en los que se prueban los módulos, sirve para intentar detectar cinco tipos de fallo principalmente:

1. Defectos visibles
2. Circuitos abiertos
3. Pérdida de eficiencia
4. Procesos de insolación
5. Anomalías en la corriente

Si todos los módulos pasan los test de prueba, están listos para salir al mercado. Si dos o más módulos no pasan los test, estos no tienen la calidad estándar. Si sólo un módulo falla se repiten las pruebas.

El IEC 61215 no son ensayos pero si pueden ayudar a mejorar la información acerca de esta.

Un módulo fotovoltaico que cumple esta norma se entiende que tiene una fiabilidad adecuada.

La tecnología con la que están fabricados los módulos también influye en la degradación de este y por tanto, en su fiabilidad. El 90% de los módulos puestos en el mercado son de silicio monocristalino. Normalmente esta tecnología no da problemas de degradación en el semiconductor dada su alta estabilidad, sino que su origen se suele dar en mecanismos externos como soldaduras, conectores y encapsulados.

3.7.1.3 Principales causas de fallo en un módulo solar

Aun sabiendo de esta alta eficiencia, existen en los módulos fotovoltaicos ciertos fallos típicos en este elemento, que son:

- **Potencia real inicial de módulos inferior a la nominal.**
- **Pérdida de potencia progresiva por degradación.**
- **Generación inferior a la de diseño por sombreado**
- **Rotura, fallo súbito (especialmente por fallo de cortocircuito del diodo de paso).**
- **Error de fabricación, vandalismo, etc.**

La causa de fallo que provoca el corte de suministro eléctrico con mayor frecuencia, dentro de la alta fiabilidad que ya poseen los paneles solares, es la pérdida de potencia por degradación.

Veamos ahora un ejemplo real de cómo afecta la **pérdida de potencia progresiva por degradación** del módulo:

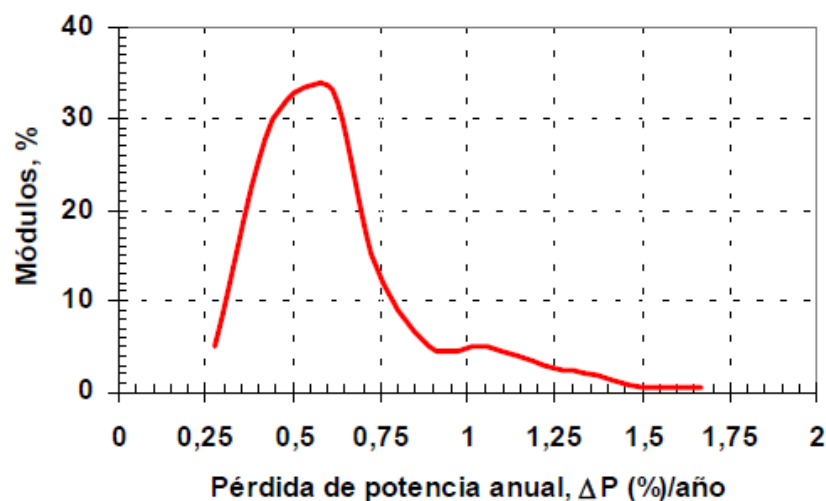


Figura 48: Pérdida de potencia por degradación de los módulos fotovoltaicos

Estos datos de módulos fotovoltaicos pertenecen a ensayos realizados en una instalación durante más de 18 años en operación realizados por el laboratorio suizo LEEE-TISO. Más de 250 módulos iguales están operando bajo las mismas condiciones ofrecen, sin embargo, una apreciable dispersión en pérdida de potencia. Tal como se observa en la figura 46, un 6% de los módulos ha sufrido pérdidas de potencia anuales superiores al 20%, un 35% de ellos entre el 10% y el 20%, y el 59% restante menos del 10%.

Veamos ahora de forma gráfica como afecta a la **irradiancia** captada por los módulos solares las **pérdidas por sombreado** para entender mejor este concepto mencionado:

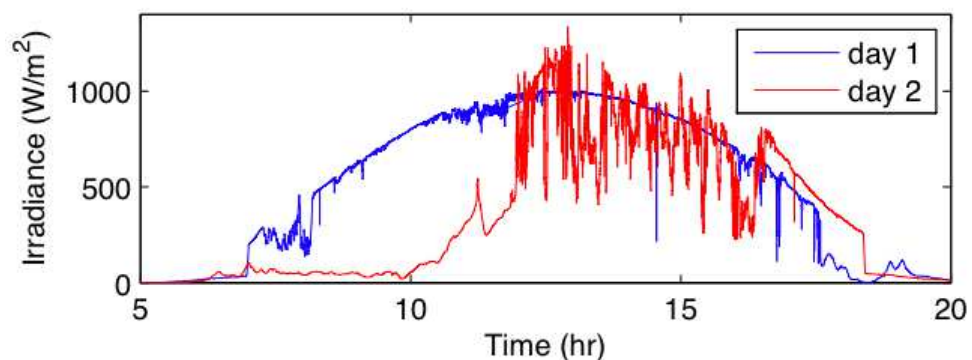


Figura 49: Datos de irradiancia de dos días distintos

Si nos fijamos en la línea azul de la figura 49 correspondiente a un día, la captación de radiación solar va creciendo y se hace máxima en las horas de mediodía. En el caso de la línea roja correspondiente a un día distinto, vemos que por nubes y condiciones climatológicas adversas el mismo sistema en las horas donde debería haber máxima decrece la captación solar y por tanto disminuye la generación eléctrica de la instalación fotovoltaica.

La **suciedad** también es algo a tener en cuenta, ya que reduce la capacidad del módulo de captar energía, especialmente en época de lluvias y viento. Entra dentro de las labores de mantenimiento.

3.7.1.4 Diagrama de bloques de fallo del módulo fotovoltaico

El siguiente diagrama de bloques agrupa las principales causas de fallo de los módulos fotovoltaicos que se han mencionado. Basándonos en la figura 49, se observa que un fallo de los cuales mencionados anteriormente provoca la interrupción del módulo.

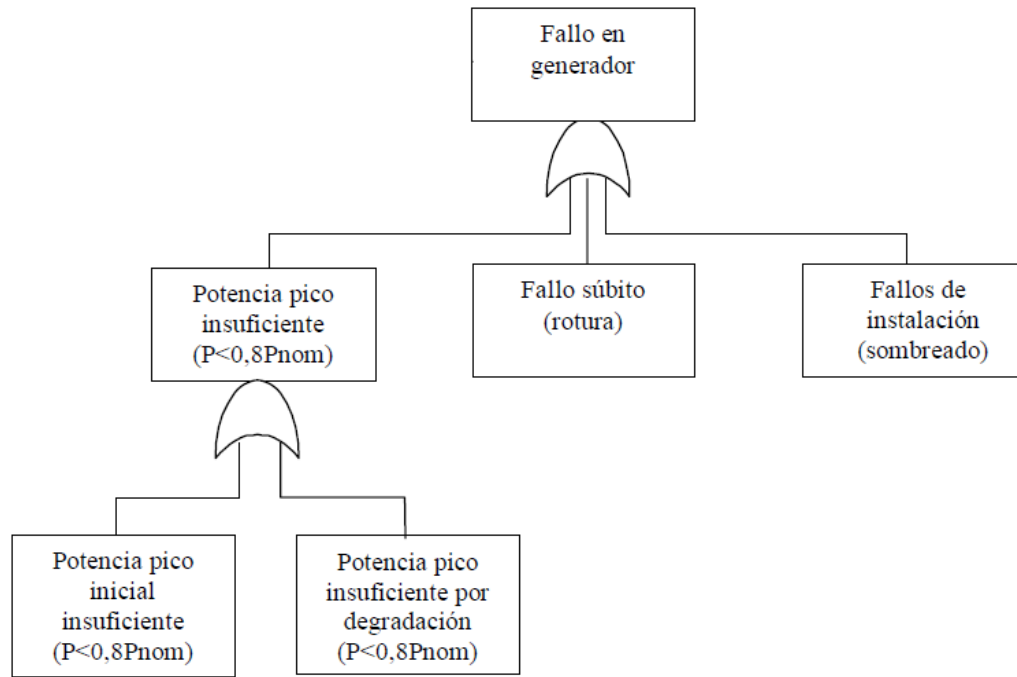


Figura 50: Diagrama de bloques de fallo en los módulos solares

3.7.1.5 Mantenimiento del módulo fotovoltaico

A continuación se describen algunos trabajos necesarios para el correcto mantenimiento para la durabilidad y optimización de los módulos:

Los módulos fotovoltaicos requieren un mantenimiento muy escaso, debido a su propia configuración. Normalmente no tienen partes móviles y las celdas y sus conexiones internas están encapsuladas en varias capas de material protector. Es conveniente hacer una inspección general 1 ó 2 veces al año: asegurarse de que las conexiones entre paneles y al controlador están bien ajustadas y libres de corrosión. En la mayoría de los casos, la acción de la lluvia elimina la necesidad de limpieza de los paneles; en caso de ser necesario, simplemente utilizar agua y algún detergente no abrasivo.

3.7.1.6 Análisis matemático

A continuación se muestra un análisis de evaluación de fiabilidad por degradación

La **degradación progresiva** puede evaluarse matemáticamente de la siguiente forma:

$$p(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp - \frac{1}{2} \left[\frac{P - \mu}{\sigma} \right]^2$$

P representa la función densidad de probabilidad la cual sigue una **distribución normal** donde: P es la potencia de pico de salida del módulo

(Wp), μ es el valor medio de potencia de pico (Wp), y σ es la desviación estándar.

La potencia media de pico se calcula como:

$$\mu(t) = P_0 - At$$

Donde P_0 es la potencia de salida de pico en el instante $t = 0$, A es el parámetro que refleja el decrecimiento anual de la potencia de pico del módulo, y t es la variable tiempo en años.

Pero esta última ecuación es válida si asumimos que A es constante durante todo el tiempo, lo cual no es cierto (ver figura 50).

La degradación de potencia en los módulos se aproxima bastante, sin serlo, a una lineal:

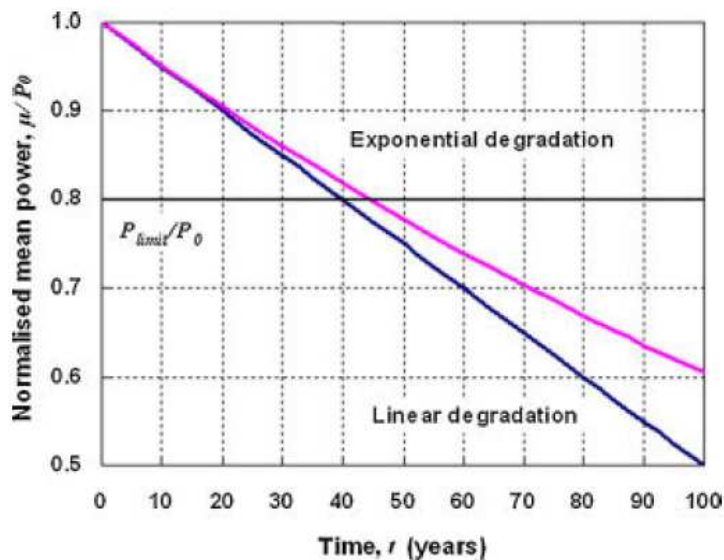


Figura 51: Degradación lineal en módulos

Debemos asegurar que lo que tiene que ser constante sea la relación:

$$\frac{\mu(n) - \mu(n-1)}{P_0} = -\frac{A}{P_0} = cte$$

En cuanto a la desviación estándar σ , aproximaremos en un primer análisis que sigue una degradación lineal a lo largo del tiempo:

$$\sigma(t) = \sigma_0 + Bt$$

Tenemos que σ_0 es la desviación estándar en el instante $t = 0$, B es el parámetro que refleja el incremento anual que sufre la desviación estándar en Wp/año ya que la diferencia de comportamiento entre los mismos módulos va creciendo y por tanto σ es creciente, y t es la variable tiempo en años.

Como la desviación estándar no varía linealmente, tenemos que asegurar que:

$$\frac{\sigma(n) - \sigma(n-1)}{P_0} = \frac{B}{P_0} = cte$$

Finalmente y en base a las anteriores ecuaciones tenemos que la función densidad de probabilidad es:

$$p(P, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\sigma_0 + Bt)} \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{P - (P_0 - At)}{\sigma_0 + Bt} \right]^2 \right]$$

En la siguiente figura vemos como evoluciona esta última ecuación a lo largo del tiempo. Se ha representado en cinco instantes de tiempo:

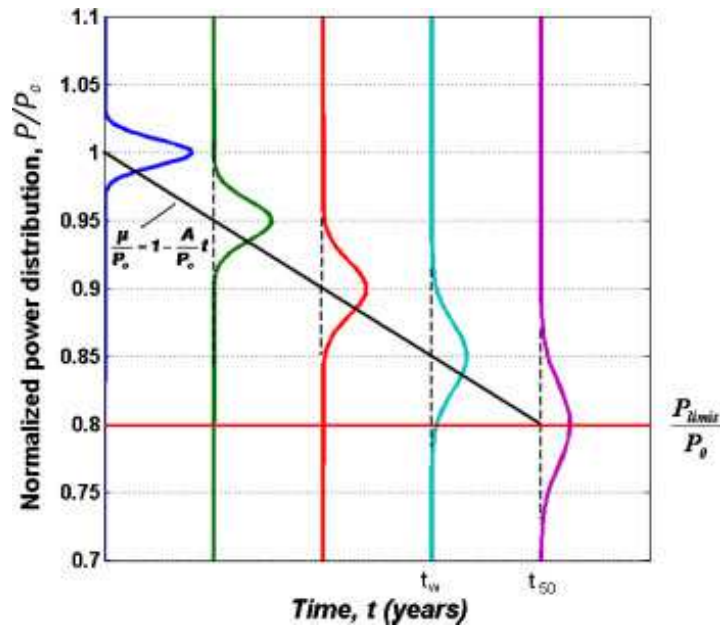


Figura 52: Evolución de la distribución normal en los módulos solares

La figura 52 es muy esclarecedora. Se observa claramente que a medida que pasa el tiempo, la desviación σ es mayor, así por ejemplo, cuando la media de potencia de los módulos es $P_{lim} = 0.8P_0$ (curva morada), la mitad de los módulos están en condiciones óptimas de seguir operando pues su potencia de salida está por encima de $0.8P_0$ mientras que la otra mitad del total de los módulos está por debajo de la potencia límite P_{lim} . En ese mismo instante, la

potencia media ha disminuido con respecto a los anteriores instantes de tiempo, mientras que en el instante inicial (curva azul) tenemos el pico máximo y desviación mínima.

En cuanto a la fiabilidad definimos que:

$$R(t) = \int_{P_{lim}}^{\infty} p(P, t) dP = 1 - \Phi\left(\frac{P_{lim} - (P_o - At)}{\sigma_o + Bt}\right)$$

Donde Φ es la acumulación de la función probabilidad de la distribución Normal.

En la siguiente figura podemos ver representada la fiabilidad para distintos valores de degradación anual y con $B = 0$:

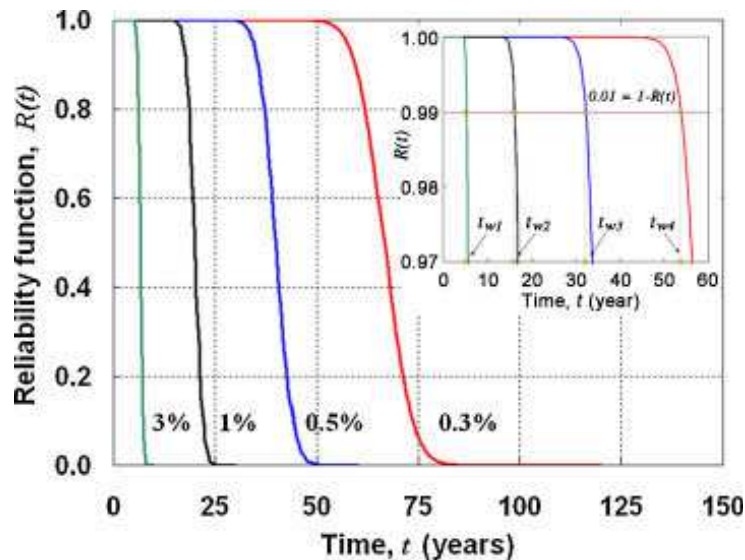


Figura 53: Fiabilidades para diferentes tasas de degradación

Salta a la vista en la figura 53 que a medida que la tasa de degradación anual aumenta, la fiabilidad decrece mucho más rápido, mientras que para una degradación casi mínima, la fiabilidad se hace 0 pasados 75 años.

La función densidad probabilidad de fallo es:

$$f(t) = -\frac{dR(t)}{dt}$$

La función $f(t)$ se ajusta a una distribución normal, y para diferentes tasas de degradación anual tenemos la siguiente figura y $B = 0$:

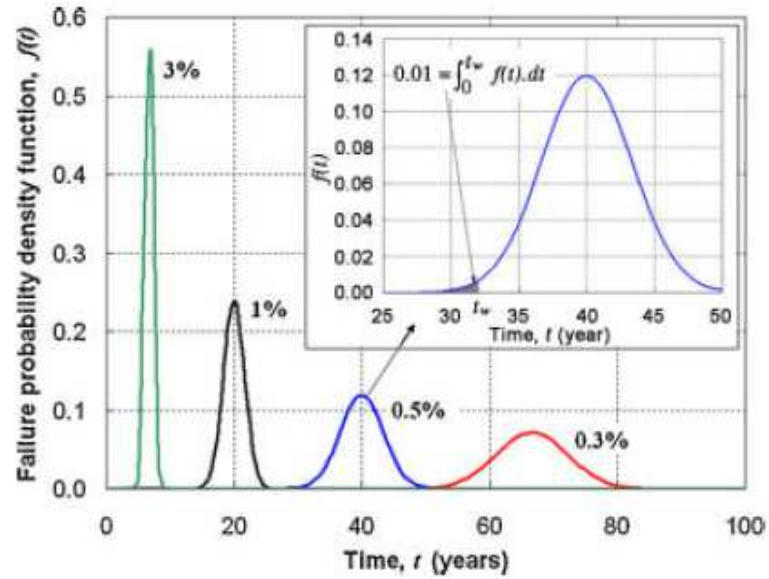


Figura 54: Funciones de densidad de probabilidad con diferentes tasas de degradación

La tasa de fallo puede estimarse como una constante a lo largo del tiempo y como se puede imaginar su expresión es:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

En la siguiente gráfica podemos ver representada la tasa de fallo para distintos valores de degradación anual y $B = 0$:

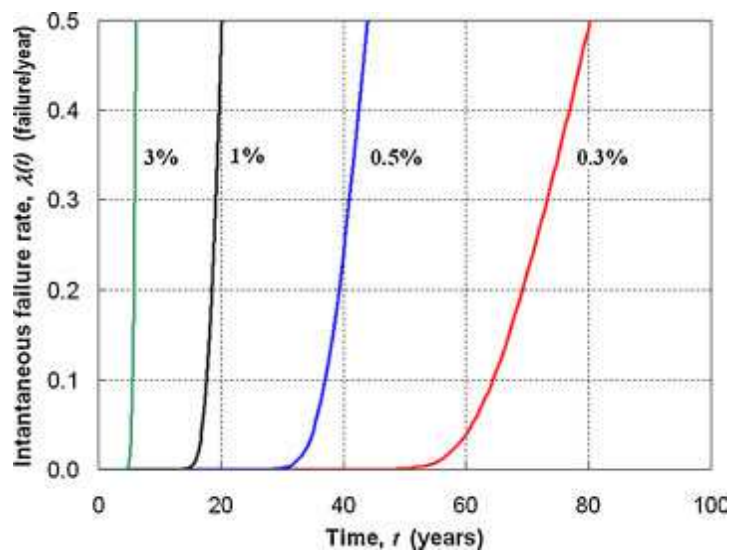


Figura 55: Tasa de fallo para diferentes tasas de degradación

Como se observa en la figura 55, la curva verde que representa una tasa de fallo con una degradación anual del 3% crece muy deprisa y es prácticamente vertical ya que en muy poco tiempo aumenta la posibilidad de fallo. En el

caso de la curva roja representada en base a una degradación anual del 0,3%, comienza a crecer de forma notable pasados muchos años.

Los parámetros de tiempo quedan definidos de la siguiente manera:

El MTTF se había definido como el tiempo medio hasta que el sistema falla por primera vez:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt$$

El t_{50} se define como el instante de tiempo en el que ya han fallado el 50% de los módulos fotovoltaicos y se define:

$$t_{50} = \frac{Po - P_{lim}}{A}$$

Evidentemente, este último parámetro sólo es útil en momentos o etapas de muy poca fiabilidad.

Se define K como el máximo porcentaje de módulos descartados o retornados a fábrica hasta un determinado instante o en un determinado periodo de operación:

$$K \leq 1 - R(t)$$

Conclusiones de los cálculos:

Con este modelo se ha evaluado la fiabilidad a partir de datos de la degradación de los módulos, los cuales encuentran en la degradación su principal causa de fallo. Las principales conclusiones de este modelo de análisis son:

- La fiabilidad de los módulos fotovoltaicos es muy alta.
- La potencia media de un conjunto de módulos en operación decrece linealmente con el tiempo.
- La tasa de degradación anual de los módulos de silicio cristalino están en el rango 0,3-3% y se mantiene durante toda la vida útil del producto. Quizás únicamente durante el primer año sea algo mayor.
- La potencia óptima esta muy sujeta a la degradación a largo plazo, luego depende del tiempo.

- De la función de fiabilidad se puede concluir que para garantizar al menos una utilidad de 25 años la tasa de degradación anual del módulo fotovoltaico no debe superar el 0,5%.
- La función de distribución de fallo es una distribución normal con desviación estándar constante ($B=0$).
- La tasa de fallo se considera por lo general bastante baja sobretodo en los primeros años en funcionamiento. La principal causa de fallo en este primer periodo de vida en funcionamiento es el fallo catastrófico aleatorio o de fabricación.

3.7.1.7 Influencia de la temperatura en los módulos:

La temperatura del módulo depende de la temperatura ambiente y la irradiancia solar.

Para ilustrar el efecto de la temperatura, en la siguiente figura se muestra el coeficiente de temperatura de 36 células en %. Se observa cómo varía la tensión en circuito abierto o de salida del módulo con la temperatura de ambiente:

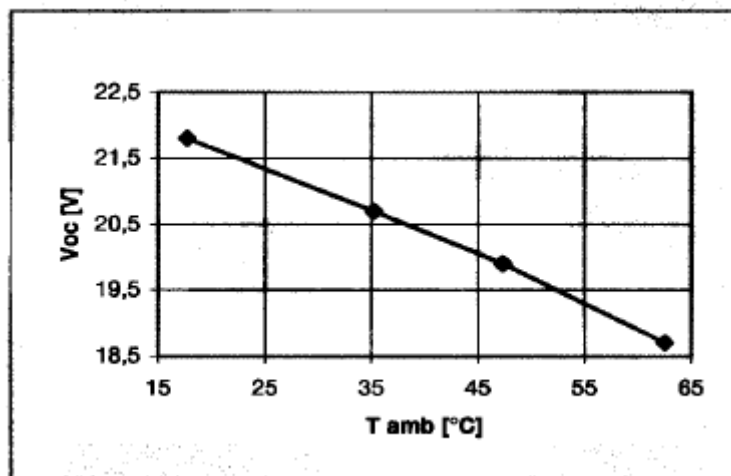


Figura 56: Variación de la tensión del módulo con la temperatura ambiente

Es decir, la temperatura ambiente influye de manera importante en el rendimiento del módulo fotovoltaico.

Como conclusión, se destaca que los módulos solares no suelen fallar de una causa catastrófica que, aunque ocurre, lo que predomina a lo largo de su vida es el fallo por degradación progresiva. En este proceso de degradación

podemos diferenciar dos escenarios o etapas: el primer año de exposición solar donde se produce una degradación ciertamente rápida, y el resto de vida en operación donde se observa una degradación algo más lenta cada año.

3.7.2 Fiabilidad de una batería

En este apartado se estudiará la fiabilidad del elemento más problemático del sistema, la batería.

3.7.2.1 Explicación general

La batería, tal como ya se ha adelantado, es considerada como uno de los elementos más problemáticos y menos eficientes dentro de los sistemas de electrificación autónomos, debido a la gran diversidad de posibles fallos que pueden aparecer a lo largo de su tiempo de vida o vida de operación. Estos fallos normalmente se dan por un mal uso o un mal mantenimiento durante su vida en operación, mientras que los fallos causados por la propia tecnología y fabricación de la batería son mucho menos predominantes.

Debido a la problemática de este elemento, y debido a la gran diferencia entre lo que serían unas condiciones óptimas de operación de la batería y las condiciones que realmente se dan sobre el terreno, el diseño o dimensionado se dificulta en cierta medida si lo que buscamos es una alta fiabilidad y por tanto disponibilidad.

3.7.2.2 Principales causas de fallo en una batería

Los fallos más típicos son los siguientes:

- **Capacidad inicial baja.**
- **Pérdida de capacidad por degradación progresiva y efecto de la temperatura.**
- **Fallo súbito**

La pérdida de potencia por degradación del paso del tiempo es el principal problema de las baterías y por ende de los sistemas fotovoltaicos

Los fenómenos más importantes que dan lugar a la degradación progresiva, la principal causa de fallo, son el **gaseo, la corrosión, la estratificación y la sulfatación:**

- Gaseo:

En la fase final del proceso de carga de una batería, cuando la cantidad de sulfato de plomo en las placas es escasa y la reacción para formar plomo y óxido de plomo se ve dificultada, parte de la energía aportada a la batería se dedica a disociar el agua del electrolito: oxígeno en las placas positivas e hidrógeno en las negativas.

- Corrosión:

Se produce una disminución de la sección útil de la rejilla que provoca, además de un aumento de la resistencia ante la circulación de corriente, un mayor riesgo de fallo por rotura. Existe alto riesgo de corrosión en zonas de elevadas temperaturas y sometiendo la batería en estado de descarga durante mucho tiempo. Es quizás uno de los fenómenos o peligros a tener en cuenta en el uso y mantenimiento de las baterías.

- Sulfatación:

Cuando la batería trabaja en condiciones de baja carga durante tiempos prolongados, por insuficiente insolación o consumo excesivo, aparece también este fenómeno. Lo que ocurre es que el sulfato de plomo que se ha ido formando en las placas durante la descarga forma cristales de tamaño considerable, provocando con el tiempo que la zona interna de algunos de estos cristales no llegue a tener contacto con el electrolito.

3.7.2.3 Diagrama de bloques de fallo en la batería

El siguiente diagrama de bloques resume y agrupa las principales causas de fallo que pueden cortar el suministro eléctrico de las baterías. A través del diagrama de la figura 57 se evaluará más adelante la fiabilidad del sistema.

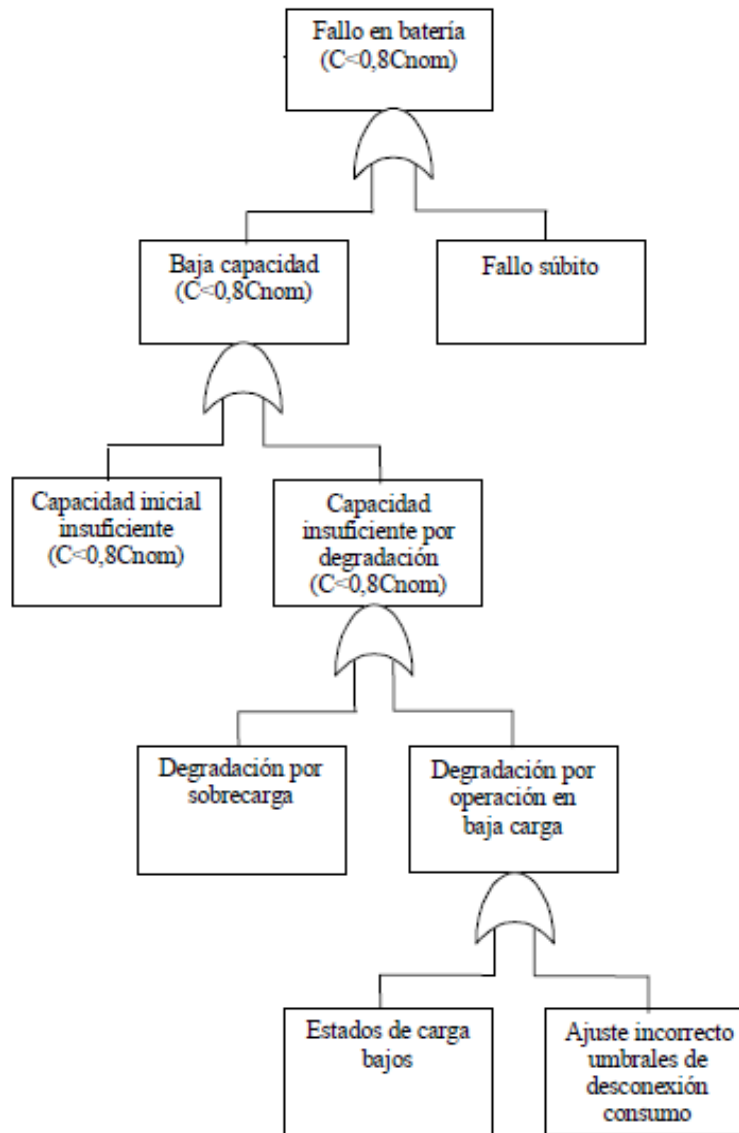


Figura 57: Diagrama de bloques de fallo de una batería

3.7.2.4 Recomendaciones en la colocación de baterías

En la colocación de baterías en sistemas fotovoltaicos autónomos siempre se debe tener en cuenta que:

- La capacidad inicial del acumulador será superior al 90% de la capacidad nominal. En cualquier caso deberemos seguir las recomendaciones del fabricante para aquellas baterías que requieran cierta carga inicial.
- La autodescarga del acumulador a 25 °C, no excederá el 6% de su capacidad nominal por mes.
- La vida del acumulador, antes de que su capacidad residual caiga por debajo del 80% de su capacidad nominal, debe ser superior a 1000

ciclos, cuando se descarga el acumulador hasta una profundidad del 50%.

- El acumulador se instalará siguiendo las instrucciones del fabricante. En cualquier caso ha de tenerse en cuenta lo siguiente:
 - o El acumulador se situará en un lugar ventilado y con acceso restringido.
 - o Se adoptaran las medidas de protección necesarias para evitar los cortos circuitos accidentales de los terminales del acumulador.
- Cada batería o vaso, deberá estar etiquetado, al menos con la siguiente información:
 - o Tensión nominal [V].
 - o Polaridad de los terminales.
 - o Capacidad nominal [Ah].
 - o Fabricante y número de serie

3.7.2.5 Mantenimiento en las baterías

A continuación describimos algunas de las operaciones de **mantenimiento** que la batería requiere, pues es el elemento del sistema que mayor atención requiere:

- Comprobación del nivel del electrolito (cada 6 meses aproximadamente): debe mantenerse dentro del margen comprendido dado por el fabricante de máximo y mínimo. Si se observa un nivel inferior en alguno de los elementos, se deben rellenar con agua destilada o desmineralizada.
- Al realizar la operación anterior debe comprobarse también el estado de los terminales de la batería, debe limpiarse de posibles depósitos de sulfato.
- Medir de la densidad del electrolito. Las densidades deben ser similares en todos los vasos. Diferencias importantes en un elemento es señal de posible avería.

3.7.2.6 Influencia de la temperatura en las baterías:

La temperatura afecta de manera importante en el comportamiento de la batería.

Cuando aumenta la temperatura ofrece menos resistencia interna y su capacidad es por tanto mayor. También ocurre que es menor la tensión a la

que comienza a producirse el fenómeno del gaseo y también se favorece la aparición de la corrosión y por tanto se acelera su envejecimiento.

Cuando por lo contrario las temperaturas disminuyen, disminuye también la capacidad de esta y en casos más extremos, congelarse el electrolito lo que significa la inactividad de la batería

3.7.2.7 Datos reales de fiabilidad

La fiabilidad de la batería se ajusta muy bien a una distribución normal. Esto es lógico ya que la principal causa de fallo es el envejecimiento. Sin embargo hay un rango de fallos iniciales donde la batería no es el elemento que mejor se ajusta a la distribución normal.

Como fuente de datos de fiabilidad de baterías hemos seleccionado dado su interés el programa de electrificación rural de Marruecos con 13.000 SHS (Solar Home System).

Se ha comprobado de esta fuente de datos de fiabilidad de baterías que a los primeros 1.4 años, la fiabilidad se ajusta a una distribución de Weibull de parámetro de forma $\beta < 1$ (corresponde a la etapa infantil). A partir de 1.4 años sí que se ajusta a una distribución normal, ya que a partir de ese momento el único posible fallo es el fallo por envejecimiento o degradación y la tasa de fallos se incrementa. Como decíamos, se ajusta a una distribución normal, de parámetros:

$$\mu = 5.46 \text{ años}$$

$$\sigma = 2.27 \text{ años}$$

Esto significa que a los 5,46 años la mitad de las baterías instaladas han fallado. Estos datos de fiabilidad son sensiblemente peores que los datos de los módulos.

Se ha anotado un MTTF de 5.46 años con un rango de límites $\pm 3.4\%$, lo que corrobora que, como compararemos más adelante con el resto de elementos que forman el sistema, es el elemento menos fiable dentro de un sistema fotovoltaico.

A partir de estos datos de fiabilidad podemos evaluar el stock de repuestos de baterías necesario para 100.000 SHS (Solar Home Systems); ver tabla siguiente. Debido a que la tasa de fallos de las baterías es creciente a medida que pasa el tiempo necesitamos un stock de repuestos mayor hasta que, como vemos, llega un punto en el que empieza a decrecer. Este decremento se debe a que muchas baterías reparadas comienzan otra vez desde cero su vida

operativa, por tanto, cuando han sido reparadas muchas baterías es difícil que poco tiempo después fallen muchas.

Año	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Baterías	2700	5910	10834	16704	21677	23497	21801	18582	16618	16855

Figura 58: Número de baterías en stock necesarias para 100000 SHS

3.7.3 Fiabilidad del regulador de carga

El regulador de carga juega un papel fundamental en el sistema fotovoltaico. Su rendimiento y fiabilidad repercute de forma notable en el elemento de menor fiabilidad dentro del sistema, la batería.

3.7.3.1 Explicación general

Las funciones principales y vitales para el sistema de las que se encarga el regulador de carga son:

- **Desconectar la carga y proteger la batería en caso de exceso de descarga.**
- **Conectar la carga y proteger la batería frente a una sobrecarga.**
- **Proteger el sistema de incorrectas conexiones o polaridades y cortocircuitos.**

Para favorecer en buen mantenimiento del propio regulador y del sistema, el regulador de carga debería:

- Indicar el nivel de carga de la batería con algún tipo de display.
- Ser capaz de soportar el añadido de más módulos para un incremento de la capacidad del sistema.
- Tener algún tipo de mecanismo seguro para proteger el sistema en caso de parada de emergencia y para su posterior restablecimiento.

3.7.3.2 Principales causas de fallo en un regulador de carga

El regulador de carga es un dispositivo electrónico y como tal, el fallo no tiene dependencia con el tiempo y por tanto en cualquier momento dadas ciertas

circunstancias puede haber un fallo que provoque la avería total del dispositivo, o simplemente por vandalismo, **por tanto su tasa de fallo a lo largo del tiempo es una constante.**

Los modos de fallo que aparecen más comúnmente en reguladores de carga de se dividen en cuatro diferentes aspectos: función de regulación (protección de batería), transmisión de corriente (fallo de algún componente electrónico interno), eficiencia, y protecciones.

Para evitar un deterioro acelerado de la batería, el regulador de carga la mantiene en un rango de operación limitado, alejado de condiciones de descarga fuerte y de sobrecarga excesiva. **Por tanto el correcto funcionamiento del regulador repercute notablemente en la fiabilidad de la batería.**

En las instalaciones donde los reguladores permiten descargas profundas de batería, el número de desconexiones disminuye en una primera etapa, ya que la energía disponible en la batería en cada ciclo es mayor; a corto plazo el servicio de cara al usuario es por tanto mejor, sin embargo, la mayor degradación de batería que se produce en estas condiciones provoca una disminución de su capacidad con lo que a medio y largo plazo la situación es la contraria; un aumento en la frecuencia de desconexión del consumo y una reducción del tiempo de vida de la batería y el fallo general del sistema.

En cuanto a una sobrecarga excesiva de la batería, esta sufre procesos de corrosión de los electrodos y de pérdida de agua en el electrolito. En unos límites más extremos se puede llegar a dañar a las cargas o equipos de consumo. En aplicaciones rurales, la degradación de la batería por sobrecarga es una de las causas más comunes de fallo en los sistemas fotovoltaicos autónomos, de hecho, consumos por debajo de lo previsto, altas temperaturas y reguladores que permiten tensiones de carga demasiado elevadas son condiciones bastante habituales en el terreno. No obstante no hay que olvidar que se debe asegurar una carga completa de la batería

Resumiendo, algunas de las problemáticas más comunes son:

- **Autoconsumo, caídas de tensión excesivas y sobrecargas:**

Cuando la batería opera en condiciones de carga bajas durante mucho tiempo el fenómeno de la degradación se incrementa y el tiempo de vida disminuye, ya que se provoca un aumento permanente de la resistencia interna y pérdida de capacidad.

En la siguiente figura se muestra la evolución en descarga (a corriente constante) de la tensión de batería con regulación y sin ella:

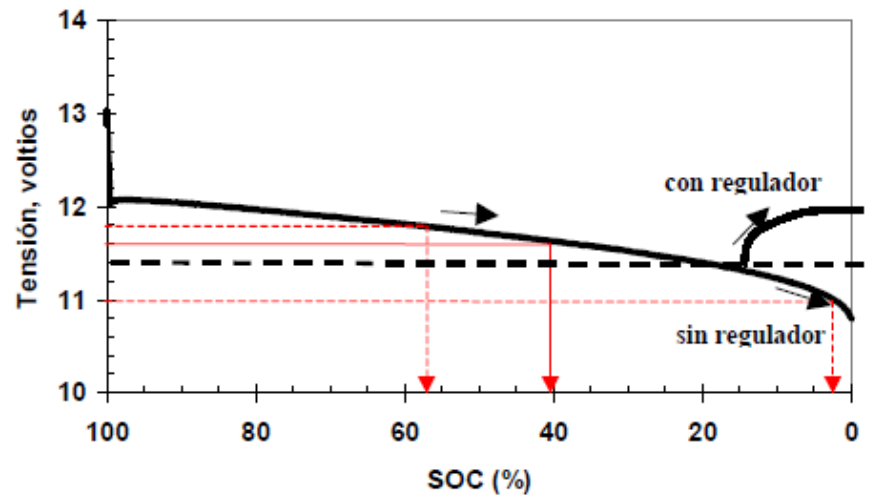


Figura 59: Evolución de la tensión de una batería con respecto al estado de carga SOC

Permitiendo descargas excesivas de batería, a corto plazo tenemos una prestación o servicio mejor para el usuario ya que la energía disponible es mayor, pero a medio y sobretodo, a largo plazo la degradación que sufre la batería es mayor y por tanto estamos reduciendo el tiempo de vida de la batería o que puede provocar el fallo total del sistema.

Por otro lado, si la batería sufre estados de sobrecarga excesiva, aparecen procesos de corrosión en los electrodos y la pérdida de agua en el electrolito. No obstante se debe asegurar una carga suficiente para su consumo. En la figura 60 se muestra la evolución de una batería sometida a medio y largo plazo:

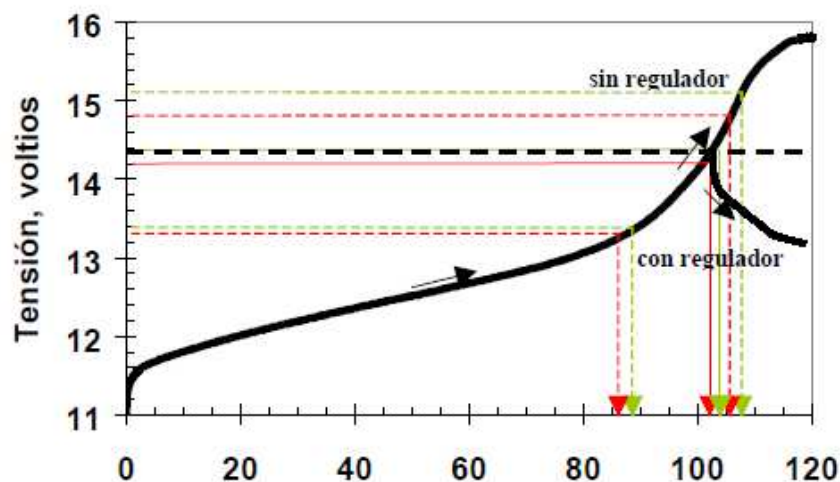


Figura 60: Tensión de la batería con y sin regulador

En los sistemas fotovoltaicos autónomos, la degradación por sobrecarga es una de las causas más predominantes de fallo. Unos valores de tensión tan elevados pueden incluso dañar las cargas o lámparas de nuestra instalación rural.

En cuanto a la eficiencia del regulador y el **autoconsumo** de este, una buena elección del regulador debe garantizar la transmisión de corriente segura y con mínimas pérdidas en la circuitería del regulador. En la siguiente figura se mide el autoconsumo de varios reguladores:

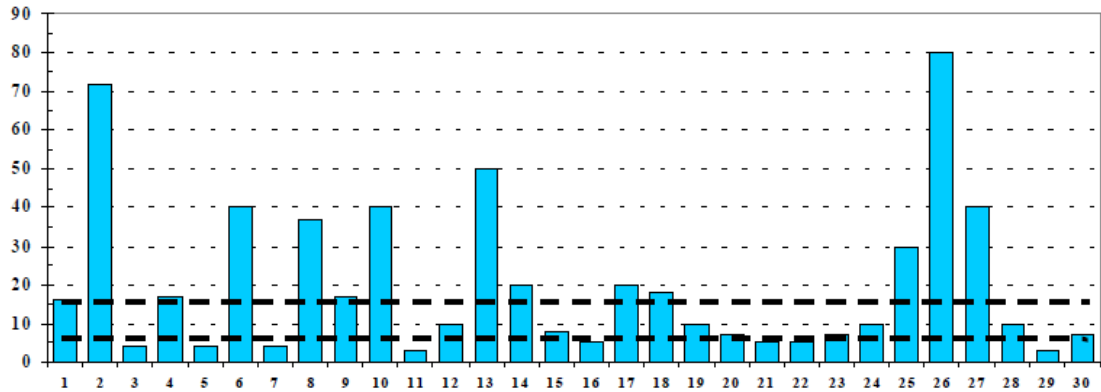


Figura 61: Autoconsumo de diferentes reguladores (mA)

Las líneas discontinuas son los consumos mínimos y recomendados. Como vemos en la figura 61, la mayoría de reguladores sigue una tónica decente, mientras que algunos reguladores es posible que presenten alguna anomalía dado el elevado autoconsumo.

- **Regulación incorrecta de batería por mal ajuste en diseño inicial o desajuste durante operación.**

Los ajustes iniciales deben ser los correctos y basados en el sistema instalado y las necesidades que se vayan a cubrir.

Conviene asegurar el mantenimiento de los umbrales fijados inicialmente durante la operación del sistema. Se encuentran casos donde algunos reguladores ajustados inicialmente en los mismos valores, ofrecen una regulación bastante diferente después de meses de funcionamiento que otros reguladores idénticos, provocado por un reajuste manual que, sin embargo, en este caso no aporta un beneficio que se aprecie a corto plazo.

- **Ausencia de funciones de protección, fallos de transmisión de corriente:**

Hay fallos eléctricos que aparecen en el propio regulador y que provocan el fallo total del sistema: relé de interrupción, pistas, fusibles no repuestos, etc. Cuando esto ocurre, dependiendo del elemento se sustituye o se tiene que cambiar el regulador entero.

Recordando la influencia de la temperatura, junto al diseño de disipadores de calor adecuados, es también habitual la selección de dispositivos de interrupción con corrientes nominales sobredimensionadas respecto a los

valores de operación reales. Se introduce así un margen de seguridad mayor ante posibles sobrecalentamientos, a costa de incrementar el coste del equipo.

3.7.3.3 Diagrama de bloques de fallo en el regulador de carga

A continuación (ver figura 61) dibujamos el diagrama de bloques que agrupa los orígenes de un posible fallo en el regulador de carga. En base a este diagrama se analiza la fiabilidad por bloques del regulador de carga, y más adelante en este trabajo, del sistema final.

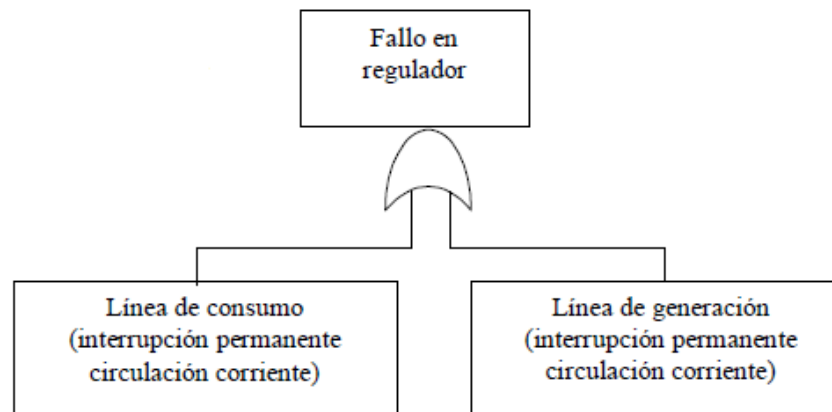


Figura 62: Autoconsumo de diferentes reguladores

3.7.3.4 Mantenimiento en los reguladores de carga

En cuanto a las operaciones de mantenimiento más típicas de los reguladores de carga en el terreno de la electrificación rural, podemos comentar las siguientes y más fundamentales:

- Observación visual del estado y funcionamiento del regulador
- Comprobación del conexionado y cableado del equipo
- Observación de los valores instantáneos del voltímetro y amperímetro dando un índice del comportamiento de la instalación.

3.7.3.5 Datos reales de fiabilidad

Aunque los diferentes fabricantes den datos de fiabilidad de reguladores, tomaremos datos reales del programa de electrificación rural de Marruecos de 13.000 SHS (Solar Home System), se ha medido y comprobado que el **regulador de carga es un elemento que se modela y ajusta a una distribución exponencial.**

Concretamente sigue una distribución exponencial con tasa de ocurrencia de:

$$\lambda = 3.67 \text{ \%/año}$$

Es decir, se tiene una tasa de fallo constante, lo que significa que anualmente fallan 3,67 reguladores de carga, independientemente del instante en que se mida.

Se ha medido un MTTF de 27.25 años con un rango variable limitado en $\pm 9.5\%$. Concretamente se ha observado que el 36,8% de los reguladores de carga sigue operativo después de 27,25 años.

Para un análisis de repuestos de 100.000 SHS se puede evaluar sabiendo que al tener una tasa de fallos constante el número de fallos no depende del tiempo, luego la necesidad de repuestos no aumenta con el tiempo, es siempre la misma. En este caso el 3,67% por año de elementos necesitarán repuestos en el stock.

Por tanto, se puede afirmar que el regulador es un elemento con una fiabilidad sensiblemente mayor que las baterías.

3.7.3.6 Seguridad en el regulador de carga

También es muy importante reservar un coste a los elementos de protección a la hora de dimensionar una instalación. La falta de repuestos de fusibles de protección, varistores, puede provocar la muerte súbita del regulador y las cargas. La identificación de la polaridad también debe quedar siempre muy clara en todos los puntos de conexión del sistema para evitar accidentes.

Por último, podemos concluir que el regulador es un elemento esencial en la vida de la batería y por ello debe de elegirse de manera muy cuidadosa, de acuerdo a estándares y normativas, ya que los parámetros de operación de este determinarán el incremento o la disminución de la vida útil de la batería y por consecuencia del sistema.

3.7.4 Fiabilidad del inversor

El inversor es un elemento dentro de un sistema fotovoltaico aislado, y sujeto a las cargas que vayan a colocarse (cargas que necesiten corriente alterna). A continuación abordaremos su fiabilidad.

3.7.4.1 Explicación general

Como ya se comentó a modo de introducción, el inversor es un dispositivo muy útil dentro de los sistemas de electrificación autónomos, ya que permite a los usuarios utilizar cargas convencionales de corriente alterna que son fáciles de encontrar en el mercado de la red eléctrica, mediante la conversión de la corriente continua generada en los módulos fotovoltaicos en corriente alterna para dichas cargas.

Las cargas de consumo de corriente alterna están diseñadas para trabajar en las condiciones particulares de la red eléctrica convencional, es decir, buena regulación de voltaje y frecuencia, baja distorsión armónica, capacidad de entrega de elevadas corrientes.

Estos elementos pueden generar tensiones alternas de 125 V ó 220 V.

La conversión DC/AC también causa pérdidas de energía en el sistema, por lo que tienen que compensarse consumiendo vatios desde el generador fotovoltaico.

3.7.4.2 Principales causas de fallo en el inversor

Como todos los elementos del sistema, puede concurrir en algunos fallos que provoquen la caída del sistema.

Entre las problemáticas más comunes, se pueden destacar:

- **Fallos en los niveles de potencia nominal y del arranque**
- **Regulación irregular de tensión y frecuencia**
- **Distorsiones armónica**
- **Umbrales de desconexión**
- **Rizado**

Sus fallos más comunes son fallos puramente electrónicos, ocurren con independencia del tiempo y por tanto **su tasa de fallo es constante** (distribución exponencial)

3.7.4.3 Influencia de la temperatura en el inversor

Como cualquier otro dispositivo electrónico, la temperatura influye en la disponibilidad de este y por tanto en su fiabilidad. Veamos un ejemplo en la figura 62 de cómo varía el MTTF (horas) según aumenta la temperatura ambiente:

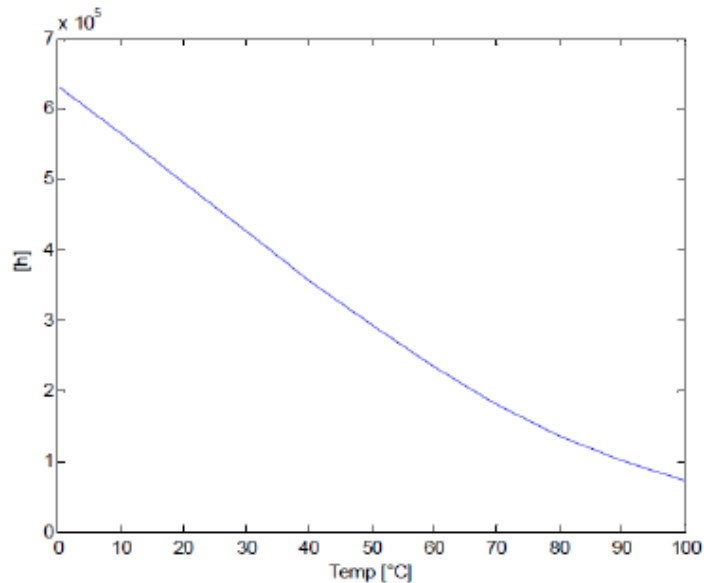


Figura 63: Evolución del MTTF (horas) con la temperatura ambiente

Como es lógico, en temperaturas muy elevadas y poco apropiadas para el funcionamiento óptimo de componentes electrónicos, el MTTF disminuye de forma cuanto menos considerable.

3.7.4.4 Mantenimiento en el inversor

En cuanto a labores de mantenimiento, requiere idénticos cuidados que el regulador de carga y como cualquier otro tipo de dispositivo electrónico. Esto es, observación visual del estado y funcionamiento del dispositivo, comprobación del conexionado y cableado del equipo y observación de los valores instantáneos del voltímetro y amperímetro, fundamentalmente.

3.7.4.5 Seguridad en el inversor

El inversor es un elemento que puede verse sometido a condiciones de operación inapropiadas y peligrosas. Tal es el caso de la conexión de una carga que supera la potencia nominal del inversor o de un cortocircuito. Por ello y llegados a este punto, se destaca la necesidad de protección contra sobrecarga y cortocircuito, y la desconexión de la alimentación que puede ocurrir cuando el regulador desconecta la carga para proteger a la batería. Por tanto, esta protección parece muy necesaria cuando el inversor se conecta en los terminales de consumo del regulador de carga.

De forma especial en zonas tormentosas, también es recomendable asegurar la protección del inversor contra sobrecargas inducidas por la caída cercana de rayos.

Se observa por tanto el requerimiento de protecciones eléctricas en los inversores en la fase de dimensionado.

3.7.5 Fiabilidad en el cableado y conectores

El cableado se considera un componente secundario dentro del sistema fotovoltaico completo. En algunos trabajos de fiabilidad a veces ni se tiene en cuenta este punto del sistema, ya que se trata de un elemento del circuito muy fiable y de fácil cuidado y mantenimiento

3.7.5.1 Principales causas de fallo en el cableado y conectores

Según la experiencia y las fuentes de datos consultadas, las principales causas de fallo y más comunes son:

- **Caídas de tensión excesivas**
- **Cortocircuito**
- **Oxidación de los conectores**

Su distribución de fallo sigue una gráfica exponencial y **su tasa de fallo se considera constante** con el tiempo. Algunas fuentes dan estimaciones dan datos concretos y afirmar que la tasa de fallo para un cable de corriente alterna de 1 metro es de $13 \cdot 10^{-9}$, mientras que para un cable de corriente continua es de $48,3 \cdot 10^{-9}$.

Se tiene por aceptable unas pérdidas en el cableado no superiores al 5%. Si se requieren cables con pérdidas muy por debajo del 5% o casi nulas, el coste de este se incrementa dada su calidad.

3.7.5.2 Diagrama de bloques de fallo del cableado

A continuación mostramos, como se hiciera con todos los elementos del sistema fotovoltaico autónomo, el diagrama de bloques que desglosa las principales causas u orígenes de fallo:

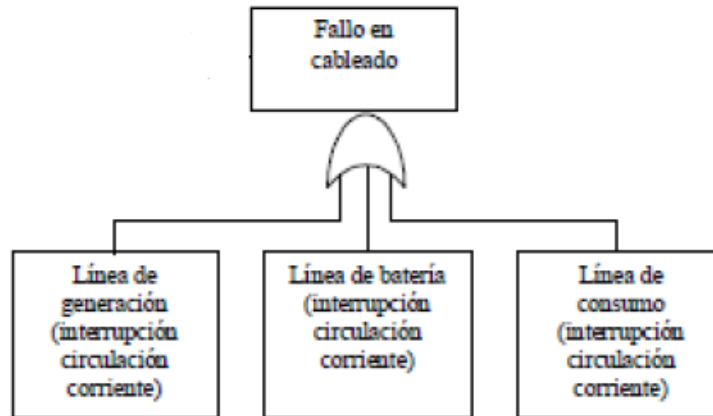


Figura 64: Diagrama de bloques de fallo en el cableado y conectores

3.7.5.3 Seguridad en el cableado

Basándonos en diversas normativas técnicas especializadas, nombraremos algunos requisitos importantes en temas de normativa y seguridad con respecto a estos elementos del sistema:

- Las secciones de los conductores deben ser tales que las caídas de tensión en ellos sean inferiores al 3% entre el generador fotovoltaico y el regulador de carga, inferiores al 1% entre la batería y el regulador de carga, e inferiores al 5% entre el regulador de carga y las cargas.
- Todos los cables deben respetar un código de colores y estar debidamente etiquetados.
- Los terminales de los cables no deben favorecer la corrosión que produce cuando hay contacto entre dos metales distintos.

Existe un amplio material con regulaciones y normativas que puede ser útil para lograr la optimización del cableado y por tanto del sistema, como es la Norma Técnica Universal para Sistema Fotovoltaicos.

3.7.5.4 Mantenimiento del cableado y los conectores

El mantenimiento o atención que requiere el cableado se basa únicamente en inspección visual de su estado y funcionamiento, comprobación de terminales, empalmes y sistemas de puesta a tierra.

3.7.6 Fiabilidad de las cargas (Lámparas)

Normalmente las cargas se quedan fuera del análisis de fiabilidad de un sistema fotovoltaico. En nuestro caso vamos resumir sus principales problemas y a dar algunos datos correspondiente al programa de electrificación rural de Marruecos sobre la instalación de 13.000 SHS (Solar Home Systems).

3.7.6.1 Principales causas de fallo en las cargas

A continuación se va a comentar los fallos más típicos que pueden ocasionar que las lámparas no cumplen su cometido, que es el de ofrecer iluminancia en las zonas rurales:

- **Variación en las condiciones de operación y que difieren de las condiciones previamente diseñadas y dimensionadas.**
- **Diseño o dimensionado ineficaz por escasa información técnica.**
- **Indisponibilidad de piezas o componentes fiables en las lámparas.**
- **Insuficientes controles de calidad en el proceso de fabricación de las lámparas.**

3.7.6.2 Datos reales de fiabilidad

Se ha visto en la fuente de datos mencionada, que las lámparas siguen a lo largo de su vida una distribución de fallo exponencial con tasa de ocurrencia de:

$$\lambda = 5,9 \% \text{ anual}$$

Se ha medido un MTTF de 16,5 años con un rango limitado en $\pm 7\%$.

Para un análisis de repuestos de 100.000 SHS se puede evaluar sabiendo que al tener una tasa de fallos constante el número de fallos no depende del tiempo, luego la necesidad de repuestos no aumenta con el tiempo, es siempre la misma. En este caso el 5,9% por año de elementos necesitarán repuestos en el stock.

3.7.7 Fiabilidad final de un sistema fotovoltaico autónomo

Antes de agrupar todos los elementos, veamos un **resumen** de todos los fallos y su identificación:

- **Generador fotovoltaico:**

Potencia real inicial de módulos inferior a la nominal.

Pérdida de potencia progresiva por degradación.

Pérdidas por sombreado.

Rotura repentina, fallo súbito (especialmente por fallo de cortocircuito del diodo de paso).

Vandalismo.

- **Batería:**

Capacidad inicial baja.

Pérdida de capacidad por degradación progresiva (distintos fenómenos de degradación).

Fallo súbito.

- **Regulador de carga:**

Interrupción de circulación de corriente.

Autoconsumo y caídas de tensión del propio regulador.

Regulación incorrecta de batería.

Ausencia de elementos de protección.

- **Cableado:**

Caídas de tensión excesivas.

Cortocircuito.

Oxidación de conectores y empalmes.

Agrupando todos los elementos (respectivos diagramas de bloques) y dado que estamos hablando en todo momento de **conexión serie** entre los elementos que componen el sistema, tenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar que el **fallo de un solo componente repercute en la falta de suministro eléctrico del sistema**, tal como se explico en teoría de fiabilidad:

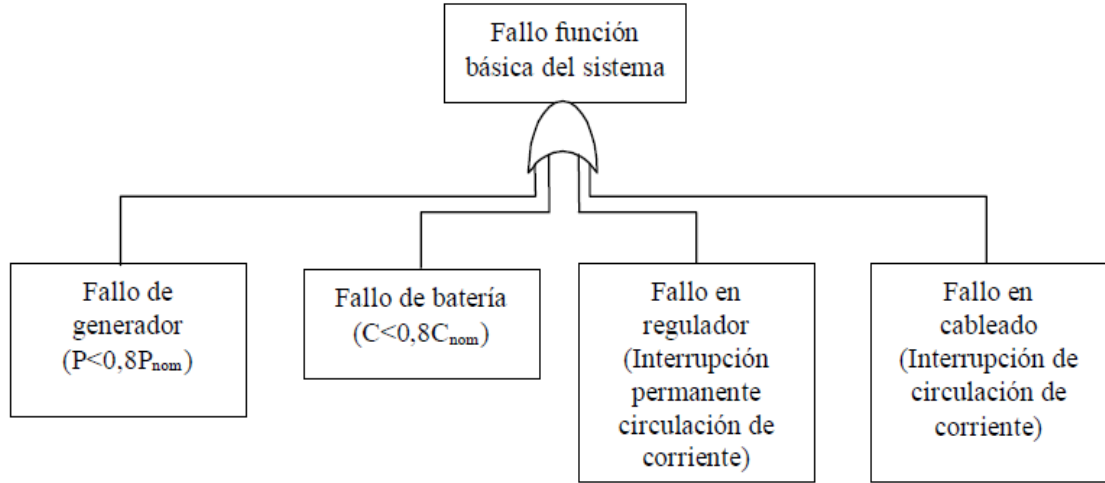


Figura 65: Diagrama de bloques de fallo del sistema en conjunto

Debido a que para que funcione el sistema es necesario que todos los elementos funcionen, tenemos un diagrama de bloque en serie.

Dicho de otro modo, la fiabilidad total del sistema en su conjunto con conexión serie se escribe de la siguiente forma:

$$R_{tot} = \prod_{i=1}^n R(E_i)$$

$$R_{tot} = R(PV \text{ mod}) \cdot R(Bat) \cdot R(Reg) \cdot R(Cab) \cdot R(Cargas) =$$

$$e^{-\int_0^t \lambda_{pv}(t) dt} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_{bat}(t) dt} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_{reg}(t) dt} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_{cyc}(t) dt} \cdot e^{-\int_0^t \lambda_{cargas}(t) dt}$$

Es decir, la fiabilidad del sistema fotovoltaico autónomo resulta de la multiplicación de las fiabilidades de los elementos que lo componen ya que están conectados en serie, esto es, la fiabilidad del módulo fotovoltaico (PVmod), la fiabilidad de la batería (Bat), la fiabilidad del regulador o controlador de carga (Reg), la fiabilidad del cableados y los conectores (Cab), y la fiabilidad de las lámparas de luz (Cargas).

Veamos la fiabilidad del sistema representada en el siguiente **ejemplo de escenario** y como repercute cada elemento en la fiabilidad total del sistema:

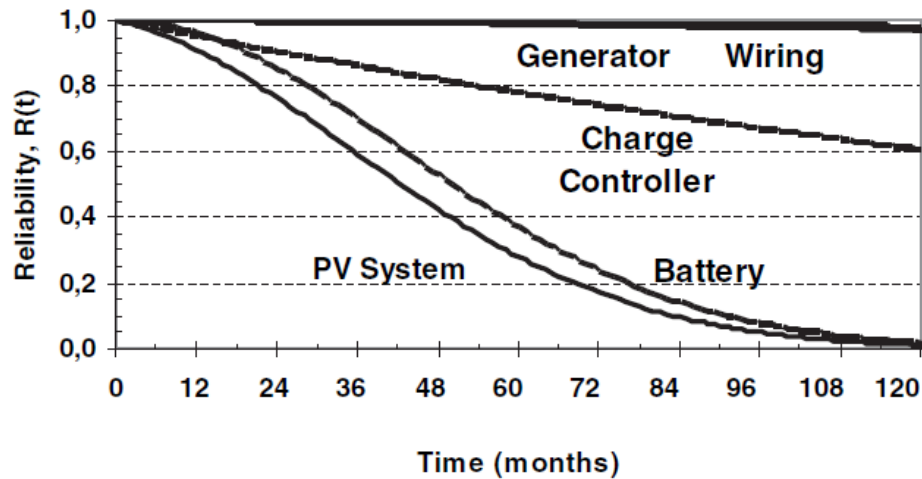


Figura 66: Ejemplo de escenario de fiabilidad de un sistema fotovoltaico autónomo

Tal como se observa en la figura 66 podemos concluir y corroborar que tanto los paneles fotovoltaicos como el cableado son elementos de altísima fiabilidad.

Como dispositivo electrónico, el regulador de carga tiene una fiabilidad más que decente, con una ligera degradación constante durante el tiempo, tal se ha explicado en el presente documento.

Si observamos la batería, el elemento más problemático de todo el sistema, se observa que su fiabilidad deja mucho que desear, pues su curva en la gráfica presenta una caída muy considerable en el periodo de operación que se muestra.

La fiabilidad del sistema resulta de la multiplicación de todos los elementos que componen el sistema, así obtenemos la fiabilidad del sistema final. De esta forma la fiabilidad del sistema serie siempre es menor que la del elemento menos fiable del sistema.

4. APLICACIONES Y EXPERIENCIA

En este capítulo se trata de ofrecer datos reales de diferentes aplicaciones y programas de electrificación (anteriormente ya se ha hecho referencia a alguna de estas fuentes da datos de programas de electrificación) con el objetivo de entender mejor la teoría vista hasta el momento y poner de manifiesto la diferencia entre condiciones óptimas o teóricas propias de las fases de diseño y las condiciones reales que pueden darse en una localización, normalmente en aplicaciones rurales.

4.1 Aplicación primera

La siguiente aplicación que se muestra se trata de una base de datos **de 421 sistemas fotovoltaicos** instalados en la **región peruana de Puno** (evaluado por la Universidad Nacional de Ingeniería de Lima). Para resumir esta fuente de datos, se presenta la siguiente gráfica:

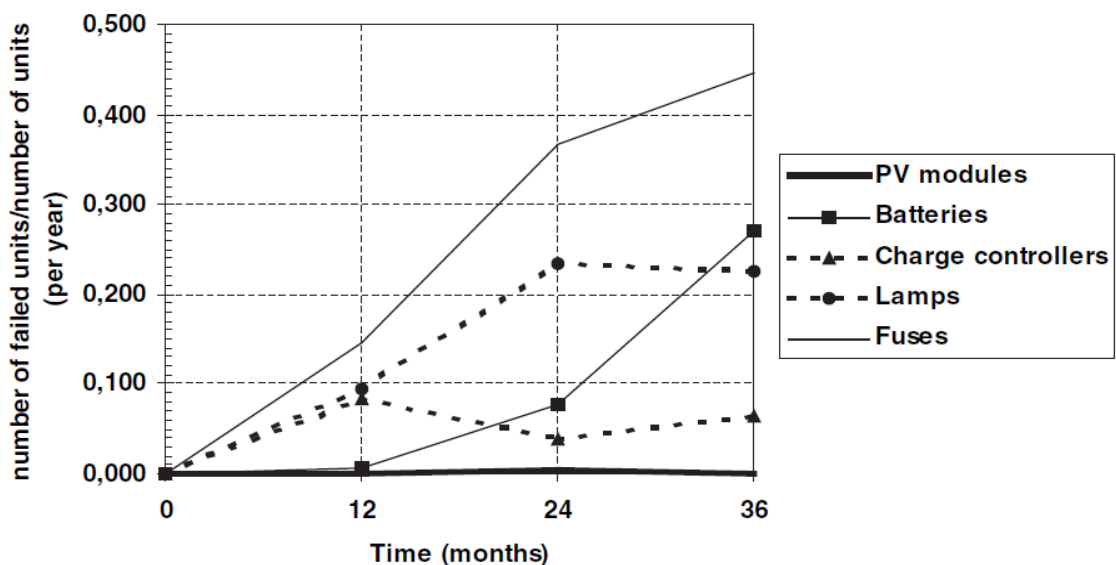


Figura 67: Representación de la fiabilidad de los 421 sistemas fotovoltaicos instalados en Perú

En la figura 67 se muestra los fallos de los diferentes elementos de un sistema durante los primeros tres años de vida.

Se puede comprobar que los módulos no presentan prácticamente fallos durante este periodo de tiempo, mientras que en el resto de elementos, salvo el regulador de carga, aumenta el número de fallos conforme pasa el tiempo.

En el caso del regulador de carga, se observa una tendencia constante, tal como se ha estudiado en este documento.

En este primer periodo de tiempo, se ve que las lámparas llegan a presentar más fallos que las baterías. Esto se debe en su mayor parte a fallos de

fabricación y montaje (época infantil de la distribución de Weibull). Poco antes de los tres años se observa que la tendencia de las baterías es de aumentar su tasa de fallos progresivamente, superando al resto de elementos.

4.2 Aplicación segunda

En la siguiente aplicación tenemos los siguientes datos y resultados:

Varios edificios públicos se van a beneficiar de la instalación fotovoltaica instalada en **Beer Lamerán village**. Se trata de 48 módulos en matriz de 4 x 12, con una potencia nominal de 75 W.

El modelo de los autores de esta fuente es muy simple debido a que asumen que la tasa de fallos de los diferentes elementos del sistema es constante.

El resultado final en cuanto a fiabilidad ha sido el siguiente:

Las tasas de fallo medidas son las siguientes:

$$\lambda_{mod} = 0.04 \text{ fallos/año}$$

$$\lambda_{reg} = 0.125 \text{ fallos/año}$$

$$\lambda_{bat} = 0.1 \text{ fallos/año}$$

$$\lambda_{inv} = 0.1 \text{ fallos/año}$$

Como:

$$R_{array} = 1 - (1 - e^{-n \cdot \lambda \cdot t})^m$$

$$R_{bat} = e^{-\lambda_{bat} t}$$

$$R_{cc} = e^{-\lambda_{cc} t}$$

$$R_i = e^{-\lambda_i t}$$

Tenemos que la fiabilidad del sistema se puede estimar de la siguiente manera:

$$R_{sys} = R_{array} \cdot R_{abat} \cdot R_{cc} \cdot R_i$$

$$R_{sys} = \left[1 - (1 - e^{-n \cdot \lambda_{mod} \cdot t}) \cdot m \right] \cdot e^{-(\lambda_{cc} + \lambda_{bat} + \lambda_i) \cdot t}$$

$$R_{sys} = e^{-0,325 \cdot t} - e^{-0,325 \cdot t} \cdot (1 - e^{-0,16 \cdot t})^{12}$$

$$f(t) = 0,325 \cdot e^{-0,325 t} + 1,92 \cdot e^{-0,485 t} (1 - e^{-0,16 t})^{11} - 0,325 \cdot e^{-0,325 t} (1 - e^{-0,16 t})^{12}$$

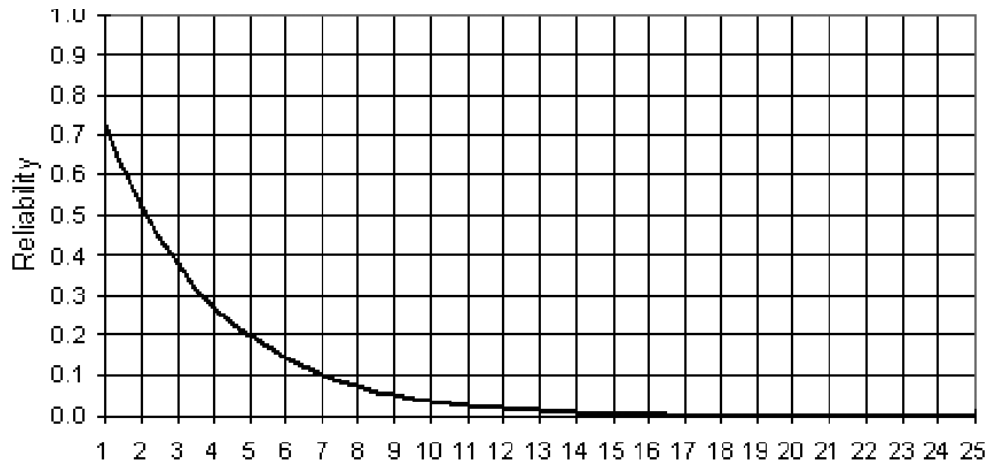


Figura 68: Representación de la fiabilidad medida de las instalaciones de Beer Lamerán village

El MTTF lo calculamos mediante:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = 3 \text{ años}$$

Las pérdidas en los cableados y conectores que se dan en esta fuente de datos son una aproximación pero resultan algo grandes, en torno al 5%.

Este modelo es muy simple ya que no tiene en cuenta, como en el caso de los demás autores consultados, que la tasa de fallos varía con el tiempo en algunos elementos del sistema.

4.3 Aplicación tercera

A continuación se van analizar **13000 instalaciones fotovoltaicas** instaladas en un programa de **electrificación rural en Marruecos**, cuyos datos ya hemos comentado en apartados anteriores para entender mejor el comportamiento de fiabilidad de algunos elementos del sistema.

Los sistemas solares se han dimensionado para dar un suministro de 75 W a 4 lámparas de luz (de 7 y 11 W). El esquema de un sistema individual es el siguiente:

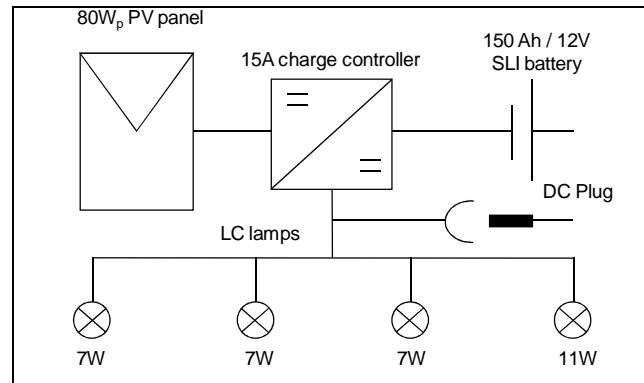


Figura 69: Circuito de un SHS del programa de electrificación de Marruecos

El módulo, de 36 células en serie, con una tensión nominal de 12 Vdc y una potencia de pico de 80 Wp, y se espera experimentar la siguiente clasificación de fallos:

- Fallos de en los diodos: Este fallo puede causar una incorrecta función del módulo dejando inoperativas varias o todas las células que lo componen. Esto puede desembocar en un mal uso de la batería y por tanto aumentar su degradación (fallo secundario).
- Rotura del módulo: Puede suceder por diversas e impredecibles causas, como son las fuertes tormentas eléctricas, vandalismo, etc.
- Fallos termográficos: Son los llamados puntos calientes del panel solar. Debido a roturas en algunas células que provocan que estas actúen de resistencia, se necesitan cámaras termográficas de infrarrojos para detectar los puntos en cuestión.

Estos han sido algunos de los resultados del programa de 13000 sistemas fotovoltaicos autónomos sobre los módulos solares:

Tipo de fallo declarado en la base de datos de monitorización	Numero fallos
Reemplazamiento sin identificar fallos	20
Modulo roto sin reemplazamiento	5
Fallo sin identificar y sin reemplazamiento	15
Total	40

Fallos declarados por el personal de mantenimiento	Numero fallos
Fallo en diodos	3
Rotura del modulo por causas ambientales	9
Rotura del modulo por causas humanas (vandalismo)	1
Problemas en los conectores de las células	6

Normalmente los fallos en diodos y en los conectores de las células solares son reparados por los técnicos. Algunos módulos rotos no fueron reemplazados por razones contractuales o bien económicas.

La conclusión de estas tablas es que aun se necesita más información para evaluar lo que está ocurriendo en los distintos fallos de los módulos y sus causas.

No obstante, ya se puede apreciar la alta fiabilidad de los módulos fotovoltaicos dado el número tan bajo de paneles resultantes críticos.

En dicho análisis, se calcula la fiabilidad total de un sistema fotovoltaico (siguiendo el esquema eléctrico) de forma analítica de la siguiente manera:

$$R_{SHS} = \prod Ri(t) = R_{PV}(t) \cdot R_{Bat}(t) \cdot R_{Reg}(t) \cdot R_{7WL}(t) \cdot R_{7WL}(t) \cdot R_{7WL}(t) \cdot R_{1WL}(t)$$

Por otro lado, la tasa de fallo del sistema podemos expresarla como la suma de la tasa de fallo de cada uno de los componentes o bloques del sistema:

$$\lambda_{SHS}(t) = \sum Ri(t) = \lambda_{PV}(t) + \lambda_{Bat}(t) + \lambda_{Reg}(t) + \lambda_{7WL}(t) + \lambda_{7WL}(t) + \lambda_{7WL}(t) + \lambda_{1WL}(t)$$

En la figura 70 se puede ver el resultado de las diferentes fiabilidades obtenidas en esta fuente de datos reales y la fiabilidad del sistema final:

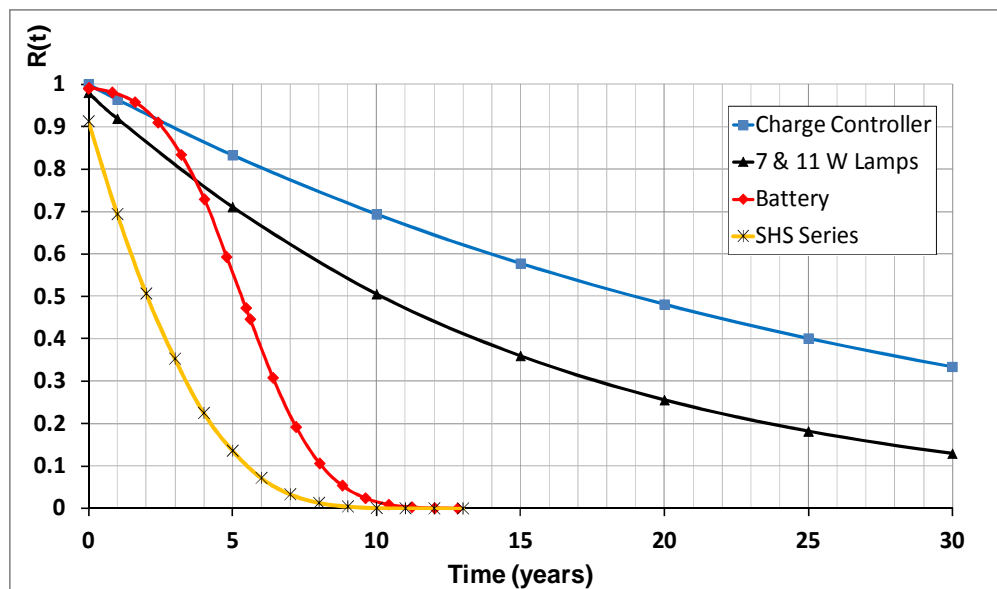


Figura 70: Fiabilidades medidas de los diferentes elementos

En la figura siguiente, se representa la tasa de fallos medida de todos los elementos y del sistema completo:

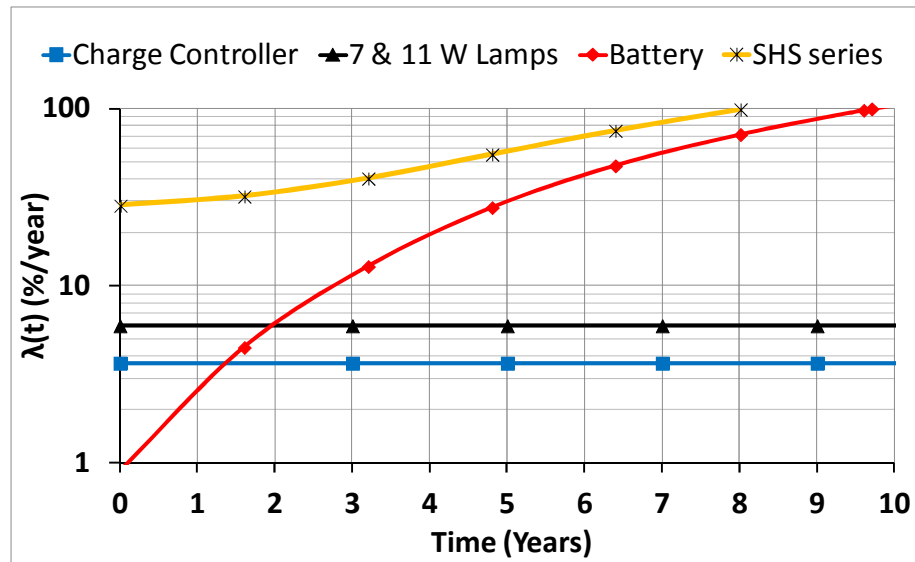


Figura 71: Evolución de la tasa de fallo de los diferentes elementos del sistema medido y del conjunto

En cuanto a la evolución de los elementos del sistema que necesitan de repuestos en stock para poder continuar con su funcionamiento, se han medidos los siguientes datos, a los cuales ya habíamos hecho referencia en apartados anteriores:

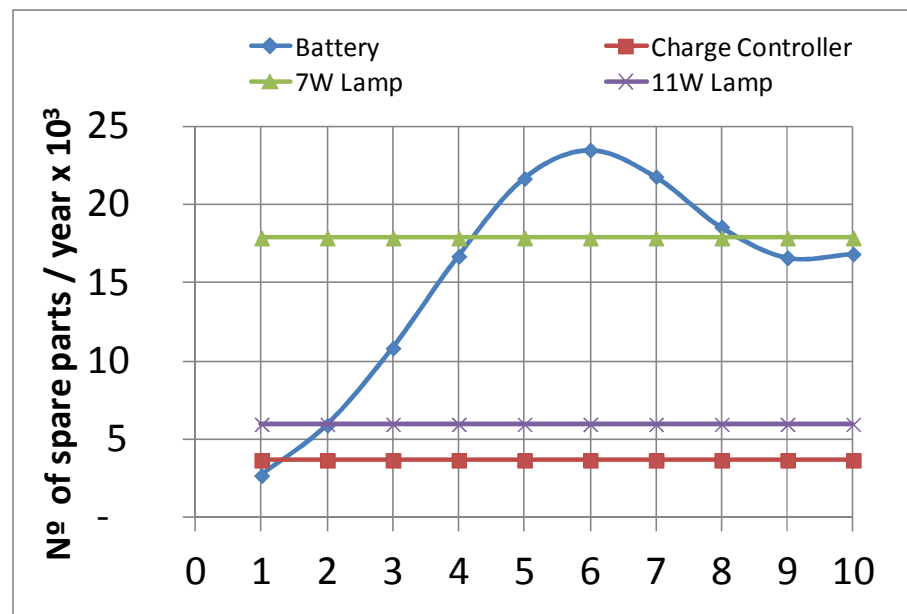


Figura 72: Evolución medida de repuestos necesarios de cada elemento del sistema

Como ya se suponía, la evolución de la tasa de fallos en el caso de las lámparas y del regulador de carga es constante, luego se corrobora lo estudiado en teoría de fiabilidad.

Las baterías siguen una tónica bien distinta, la tasa de fallos de las baterías es creciente a medida que pasa el tiempo, aunque se llega a un punto en el que empieza a decrecer, como ya se explico en el apartado 3.7.2.7.

5. CONCLUSIONES

Como primera y más importante conclusión del Proyecto Fin de Carrera se destaca la importancia de la fiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos, pues normalmente este tipo de instalaciones se localizan en emplazamientos remotos, sin personal cualificado de mantenimiento cercano ni grandes recursos logísticos y económicos.

Otras conclusiones de este PFC son:

- En todos los sistemas autónomos la dependencia de la radiación solar y el perfil de consumo a la hora de estimar esta resulta esencial. Si se desea llevar energía eléctrica a una zona remota lo correcto es ajustarse con la mayor precisión posible a la localización o zona geográfica en cuestión.
- Los programas de electrificación rural en países en vías de desarrollo han visto la necesidad de realizar análisis de fiabilidad de sus sistemas para realizar un cálculo estimado de costes del sistema en toda su vida en operación.
- Se ha explicado y demostrado que el elemento con mayor fiabilidad dentro de un sistema fotovoltaico autónomo es el módulo solar. Se puede afirmar que posee una fiabilidad muy alta.
- El elemento menos fiable de todo el sistema es la batería. El coste de la batería a lo largo de la vida del sistema es el más elevado, pues durante su vida en operación presenta una alta tasa de fallos creciente con el tiempo.
- En un término medio aparecen el regulador de carga y el inversor. Dado que son elementos puramente electrónicos, su tasa de fallo es constante con el tiempo, es decir, el número de fallos que aparecen tienen independencia con el tiempo. En el caso de regulador se ha anotado una tasa de ocurrencia de 3,67 % anual durante todo su tiempo en operación.
- A partir de los análisis y datos de fiabilidad de los elementos que forman el sistema, se ha mostrado la necesidad de tener repuestos de todos y cada uno de los componentes, así como de formar y dotar al personal técnico de mantenimiento.

Por ser en su mayoría un trabajo de recolección de datos, ha sido preciso acceder a diversas fuentes de investigación, lo que nos ha permitido contrastar diferentes perspectivas de ver una misma tecnología y aplicación.

La experiencia de numerosas aplicaciones y fuentes de datos nos enseña que la calidad de los sistemas fotovoltaicos, el mantenimiento y sus respectivas tareas deben ser estrictamente monitorizadas y analizadas.

También se ha logrado en este trabajo ampliar y fomentar la consulta de la experiencia acumulada, fuentes de datos reales de aplicaciones e instalaciones que resultan esenciales para avanzar y entender el comportamiento de los elementos de un sistema fotovoltaico en diferentes condiciones de trabajo.

La aplicación de los estudios y metodologías de fiabilidad a otros sectores energéticos deja una línea de investigación abierta muy interesante. La disposición de amplias bases de datos permitirá aplicar los modelos y cálculos con el fin de aprovechar al máximo la información.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Pablo Díaz, Miguel Ángel Egido, Frans Nieuwenhout. *Dependability Analysis of Stand-Alone Photovoltaic Systems*, 2006 (www.interscience.wiley.com).
2. L.M. Carrasco, Luís Narvarte, Manuel Vázquez, Ana Peral. *Reliability of a 13,000 SHS PV Rural Electrification Programme*, 2012. Instituto de Energía Solar.
3. Alan Ristow, Miroslav Begovic, Ajeet Rohatgi. *Modeling the effects of uncertainty and reliability on the cost of energy from PV systems. School of Electrical and Computer Engineering of Georgia, USA*.
4. Giovanni Petrone, Giovanni Spagnuolo, Remus Teodorescu, Mummadi Veerachary, Massimo Vitelli. *Reliability issues in photovoltaic power processing systems*, 2008.
5. Manuel Vázquez, Ignacio Rey-Stolle. *Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies*, 2008 (www.interscience.wiley.com).
6. A. Garro, F. Barrara. *Reliability analysis of residential photovoltaic systems*, 2011.
7. Rème Laronde, Abderafi Charki, David Bigaud. *Lifetime estimation of a photovoltaic module based on temperature measurement*, 2011.
8. Rème Laronde, Abderafi Charki, David Bigaud. *Reliability of photovoltaic modules based on climatic measurement data*, 2010.
9. Rème Laronde, Abderafi Charki, David Bigaud. *Photovoltaic system lifetime prediction using Petri networks method*.
10. Gustavo Silva. *Optimización de los sistemas de electrificación autónomos para aplicaciones de telecomunicaciones rurales*, 2010. Escuela técnica superior de ingeniería de telecomunicación.
11. Carlos Montemayor Escudero. *Instalación fotovoltaica aislada para torre de comunicaciones*, 2010. Universitat Politècnica de Catalunya.

12. Pablo Díaz Villar. *Confiabilidad de los sistemas fotovoltaicos autónomos: aplicación a la electrificación rural*, 2003. Escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación.
13. Jiirgen Garche, Dr.-Ing. Andreas Jossen, Center for Solar Energy and Hydrogen Research, *Battery Management Systems (BMS) for Increasing Battery Life Time*.
14. A.H.M.E. Reindersa, Pramusitob, A. Sudradjatb, V.A.P. van Dijkstra, R. Mulyadib, W.C. Turkenburga. *Sukatani revisited: on the performance of nine-year-old solar home systems and street lighting systems in Indonesia*, 1999.
15. Marcantonio Catelani, Lorenzo Ciani, University of Florence, *Thermal analysis of Critical components in Photovoltaic Inverter*.
16. M.R. Vervaart, F.D.J. Nieuwenhout. *Manual for the design and modification of Solar Home System components*.
17. S. Kurtz, J. Granata, M. Quintana. *Photovoltaic-Reliability R&D Toward a Solar-Powered World*, 2009.
18. Takashi Oozeki, Takao Yamada¹, Kenji Otani, Takumi Takashima, Kazuhiko Kato. *An analysis of reliability in the early stages of photovoltaic systems in Japan*, 2010.
19. W.M. Rohouma, I.M. Molokhia, A.H. Esuri. *Comparative study of different PV modules configuration reliability*.
20. Guillermo Velasco-Quesada, Francisco Guinjoan-Gispert, Robert Piqué-López, Manuel Román-Lumbreras, Alfonso Conesa-Roca. *Electrical PV Array Reconfiguration Strategy for Energy Extraction Improvement in Grid-Connected PV Systems*, 2009.
21. Jiu Liu, Norbert Henze, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES. *Reliability consideration of low-power grid-tied inverter for photovoltaic application*.
22. A. Pregelj, M. Begovic, A. Rohatgi, A. Ristow. *Estimation of PV System reliability parameters*.
23. Alexander Maish. *Defining Requirements for Improved Photovoltaic System Reliability*, 1999.

24. Bianca Martínez Cerro. Proyecto fin de carrera, 2011.
25. Francisco Javier André, Luís Miguel de Castro, Emilio Cerdá. *Las energías renovables en el ámbito internacional*.
26. Consejo Económico y Social de Murcia. Publicaciones: Fiabilidad.
27. Red Eléctrica de España, www.ree.es.
28. Internacional Energy Agency, www.iea.org.
29. www.ecologiaverde.com
30. L. Gan, G. S. Eskelanda, H. H. Kolshus, *Green electricity market development: Lessons from Europe and the US*, 2007.
31. B. Dodson, D. Nolan. *Practical reliability engineering*, 2002.
32. K. Mitchell, J. Rizk, M. Nagrial. *Balanced renewable energy systems*, 2000.
33. Y.C. Qin, N. Mohan, R. West, R. Bonn. *Status and needs of power electronics for photovoltaic inverters*, Sandia National Labs., 2002.
34. Steven L. Brunton, Clarence W. Rowley, Sanjeev R. Kulkarni, Charles Clarkson. *Maximum power tracking for photovoltaic optimization using extremum seeking*.
35. www.vidamasverde.com
36. www.solargis.info
37. www.solarweb.net